

## Capítulo 3

# Diagnóstico de la situación actual de la calidad del aire en la ZMVM

---

El diagnóstico del estado actual de la calidad del aire y de las tendencias de los contaminantes con relación al grado de cumplimiento de los niveles observados respecto de los límites fijados por las Normas Oficiales Mexicanas (NOM), destaca la necesidad de avanzar más en los casos del ozono y las partículas. Se presentan asimismo un análisis de la distribución espacial de los contaminantes, lo cual ofrece una medida indirecta del riesgo de exposición que enfrenta la población, la situación del depósito atmosférico y algunos de los resultados obtenidos recientemente en estudios realizados en la ZMVM.\*

### **3.1 Evaluación de conformidad de las NOM de salud ambiental en años recientes**

Las NOM en materia de salud ambiental establecen la concentración máxima que puede alcanzar un contaminante en el aire ambiente para que los riesgos a la salud, de los grupos más sensibles de la población, se mantengan en niveles que han sido establecidos como tolerables. Los riesgos sobre la salud se definen en función del tipo de contaminante, de su concentración, del volumen de aire aspirado y de la duración de la exposición de una persona al contaminante. La exposición puede ser aguda o crónica, siendo aguda cuando ésta es de corta duración a altas concentraciones y crónica cuando se prolonga con concentraciones moderadas. Generalmente las NOM definen dos indicadores: uno de corto plazo para la exposición aguda y otro de largo plazo para la exposición crónica. Actualmente se tienen normas vigentes para los siguientes contaminantes: ozono (O<sub>3</sub>), dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) y plomo (Pb).

#### **Dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>)**

La NOM indica un límite de 0.130 ppm promedio de 24 horas y de 0.030 ppm promedio anual (Secretaría de Salud, 1994b). Desde 2003 los niveles de este contaminante no superan los valores de la norma oficial. En el caso del año 2008 la concentración promedio de 24 horas fue menor a 0.130 ppm en todas las estaciones de monitoreo. En 2009 el valor máximo para el promedio de 24 horas se observó en estaciones del norte de la ZMVM, si bien éste cumplió con lo establecido por la NOM.

---

\* La información de la calidad del aire que se presenta y analiza en este capítulo proviene fundamentalmente del Sistema de Monitoreo Atmosférico de la SMA del Distrito Federal y de los informes 2008 y 2009 de la Calidad del Aire.

### **Dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>)**

La NOM indica un límite de 0.210 ppm como promedio horario (Secretaría de Salud, 1994c). El dióxido de nitrógeno es un contaminante que se produce junto con el óxido nítrico (NO), durante los procesos de combustión, sin embargo, en condiciones normales la emisión de dióxido de nitrógeno es mucho menor que la de óxido nítrico. En la ZMVM la mayor parte del NO<sub>2</sub> es de origen fotoquímico, se forma de la reacción en la atmósfera del óxido nítrico con algunos compuestos oxidantes, como el ozono y el radical hidroxilo (Shirley et al., 2006). A la suma de las concentraciones de NO<sub>2</sub> y NO se le conoce como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y es un parámetro fundamental para explicar la producción fotoquímica del ozono.

A pesar de la intensa actividad fotoquímica en la atmósfera de la ZMVM, durante 2008 la concentración promedio horaria no rebasó el valor establecido por la NOM. En 2009 una estación registró el valor máximo de 0.211 ppm, pero como la NOM permite que el valor de 0.210 ppm se exceda sólo una vez al año, esto no se registra como un incumplimiento de la NOM.

### **Monóxido de carbono (CO)**

La NOM establece un límite de 11 ppm promedio móvil de 8 horas (Secretaría de Salud, 1994a). El monóxido de carbono se produce durante la combustión de materiales orgánicos como el petróleo, la madera y el carbón, entre otros. Cuando la combustión ocurre en un ambiente con menor cantidad de oxígeno del que se requiere para oxidar la materia orgánica hasta dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua, se produce una mezcla de monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos.

Debido a que el daño que produce este contaminante está asociado con el efecto acumulativo del compuesto en el corto plazo, el valor de la norma refiere una exposición menor a 11 ppm en un promedio de 8 horas. De acuerdo con los registros del Sistema de Monitoreo Atmosférico, durante 2008 y 2009 no se rebasó el límite que establece la norma para este contaminante. Las concentraciones máximas se registraron en aquellas estaciones que se encuentran cerca de vialidades con tránsito vehicular intenso.

### **Ozono (O<sub>3</sub>)**

La NOM establece un límite de 0.110 ppm promedio horario y 0.080 ppm en el quinto máximo anual del promedio de 8 horas (Secretaría de Salud, 2002). El ozono es un contaminante secundario producto de la reacción fotoquímica entre los compuestos orgánicos volátiles y los óxidos de nitrógeno emitidos principalmente por los vehículos. Su concentración y distribución en la ZMVM refleja la influencia directa de las condiciones fisiográficas, de los patrones meteorológicos del Valle de México, del impacto de las emisiones generadas durante la actividad diaria de los habitantes y la capacidad oxidativa de la atmósfera. Desde que se inició el monitoreo sistemático de la contaminación del aire en 1986 no se ha registrado un solo año que cumpla con los límites definidos por la NOM. Durante los primeros años de la década de los 90, los niveles de ozono alcanzaron los máximos históricos en la ZMVM, registrando concentraciones de hasta cuatro veces el valor de la norma de 0.110 ppm.

En 2008 todas las estaciones de monitoreo superaron el valor de la NOM de ozono, tanto para el indicador de 1 hora como para el indicador de 8 horas. Entre enero y diciembre de 2008 se registraron 185 días con una concentración mayor a 0.110 ppm; las

estaciones localizadas en el poniente y suroeste registraron las concentraciones más altas y el mayor número de registros que excedieron la NOM. El indicador para 8 horas que corresponde a un valor de 0.080 ppm para el quinto máximo, se rebasó en todas las estaciones de monitoreo que reportan este contaminante. En 2009 las concentraciones de ozono rebasaron en el 49% de los días el valor límite horario establecido por la NOM.

### **Partículas suspendidas totales (PST)**

Las partículas suspendidas son una compleja mezcla de diversos materiales sólidos o líquidos suspendidos en el aire por acción mecánica, por el viento u otros factores físicos. Dependiendo de su origen, las partículas pueden variar de tamaño, forma y composición. El tamaño determina en gran medida el tiempo en que éstas permanecen en suspensión; las más grandes como el polvo del suelo se pueden sedimentar rápidamente, mientras que las más pequeñas pueden permanecer en suspensión durante varias horas o días. Las partículas más grandes tienden a depositarse cerca de su lugar de origen, mientras que las más pequeñas llegan a ser transportadas por el viento cientos de kilómetros, antes de depositarse.

Las partículas mayores a 2.5 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ) están compuestas principalmente por polvo del suelo, restos de vegetales o animales, fibras y polen. Las partículas menores a 2.5  $\mu\text{m}$  están formadas en un gran porcentaje por compuestos orgánicos e inorgánicos derivados de reacciones secundarias en la atmósfera y contienen principalmente una gran variedad de compuestos orgánicos en combinación con carbono elemental y diversos compuestos inorgánicos producidos durante la oxidación del azufre y del nitrógeno. En esta fracción se encuentran los aerosoles ácidos asociados con la formación de la lluvia ácida.

Además de los efectos en la salud humana y el medio ambiente, las partículas con diámetros menores a 1 $\mu\text{m}$  son las responsables de la disminución en la visibilidad en la ZMVM, ya que por su tamaño son capaces de dispersar la luz del sol provocando un efecto brumoso que perdura.

El incremento de la concentración de partículas en la ZMVM está fuertemente asociado con la meteorología del Valle. Durante los días de viento intenso, la resuspensión del polvo del suelo produce incrementos importantes en las concentraciones de partículas suspendidas totales (PST) y partículas menores a 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ). La presencia de inversiones térmicas de superficie puede contribuir al incremento en la concentración de partículas menores a 10  $\mu\text{m}$  y partículas finas, por la falta de dispersión y por la acumulación en la atmósfera de las partículas emitidas por los vehículos y la industria. En estas condiciones la concentración de partículas depende de la altura a la que se encuentra la base de la inversión térmica y de la duración de la misma. Las concentraciones más altas generalmente se registran cuando la capa atrapada bajo la inversión es de poca altura (menor a 1,000 metros) y la duración de la inversión se mantiene durante toda la mañana.

En 2008 en ninguna de las estaciones de monitoreo se logró el cumplimiento de la NOM. En 2009, con excepción de la estación UAM Iztapalapa (UIZ), las concentraciones de partículas suspendidas totales registradas en las demás estaciones superaron el valor de 210  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  para el valor del percentil 98 establecido en la NOM-025-SSA1-1993 (Secretaría de Salud, 2005).

### **Partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>)**

Las partículas menores a 10 micrómetros son emitidas por fuentes diversas entre las que destacan: las fuentes móviles, las vialidades sin pavimentar, las emisiones industriales, la fabricación y uso de materiales para la construcción, la industria de la fundición moldeada de metales, el suelo erosionado y la generación de energía eléctrica.

La NOM establece un límite de 120 µg/m<sup>3</sup> promedio de 24 horas, y 50 µg/m<sup>3</sup> promedio anual (Secretaría de Salud, 2005). Un alto porcentaje de estas partículas corresponde a la resuspensión del polvo del suelo debido a la circulación de vehículos sobre vialidades sin pavimentar y a las emisiones vehiculares; el resto proviene de la industria, diversas fuentes de área y fuentes naturales. El cumplimiento de la norma ha sido irregular presentando mayores problemas en la zona oriente de la ZMVM, caracterizada por vialidades de intenso tráfico vehicular y una cercanía a las zonas de donde provienen fuertes polvaredas en la temporada de estiaje.

### **Partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>)**

La NOM establece un límite de 65 µg/m<sup>3</sup> promedio de 24 horas y 15 µg/m<sup>3</sup> promedio anual (Secretaría de Salud, 2005). La presencia de partículas finas o menores a 2.5 µm de origen primario está asociada con las emisiones de vehículos como tractocamiones y autobuses. Sin embargo, en la ZMVM la mayor parte de las partículas finas que se encuentran suspendidas en la atmósfera son de origen secundario, es decir se forman a partir de la transformación de diferentes compuestos gaseosos, sólidos y líquidos que se encuentran en la misma. Debido a la complejidad de los mecanismos de formación en la atmósfera, es difícil cuantificar la contribución a la concentración de partículas a partir de las emisiones de los precursores.

Una de las evidencias más claras de la contaminación del aire es la disminución en la visibilidad, la cual se debe a la acción de las partículas en la absorción o dispersión de la luz. Esta última es proporcional a la concentración de las partículas finas y la absorción es proporcional a la concentración de especies absorbentes como el carbono.

En la ZMVM y durante 2008 y 2009 en ningún sitio se reportaron valores superiores al límite recomendado por la NOM para el indicador de 24 horas, de 65 µg/m<sup>3</sup> para el percentil 98. Sin embargo, en todas las estaciones se excedió el valor del promedio anual de la NOM de 15 µg/m<sup>3</sup>.

### **Plomo (Pb)**

La NOM establece un límite de 1.5 µg/m<sup>3</sup> promedio trimestral (Secretaría de Salud, 1994d). El plomo es un metal pesado que es emitido a la atmósfera de manera natural por las erupciones volcánicas, el aerosol marino, los incendios forestales y el polvo del suelo, o bien por actividades industriales en forma de partículas o humos. En la ZMVM se empleó el tetraetilo de plomo en las gasolinas como antidetonante hasta 1996 y era la principal fuente de este contaminante, pero desde 1997 la gasolina que se distribuye en la ZMVM no contiene plomo. Las concentraciones de plomo se han mantenido dentro de la norma desde hace varios años.

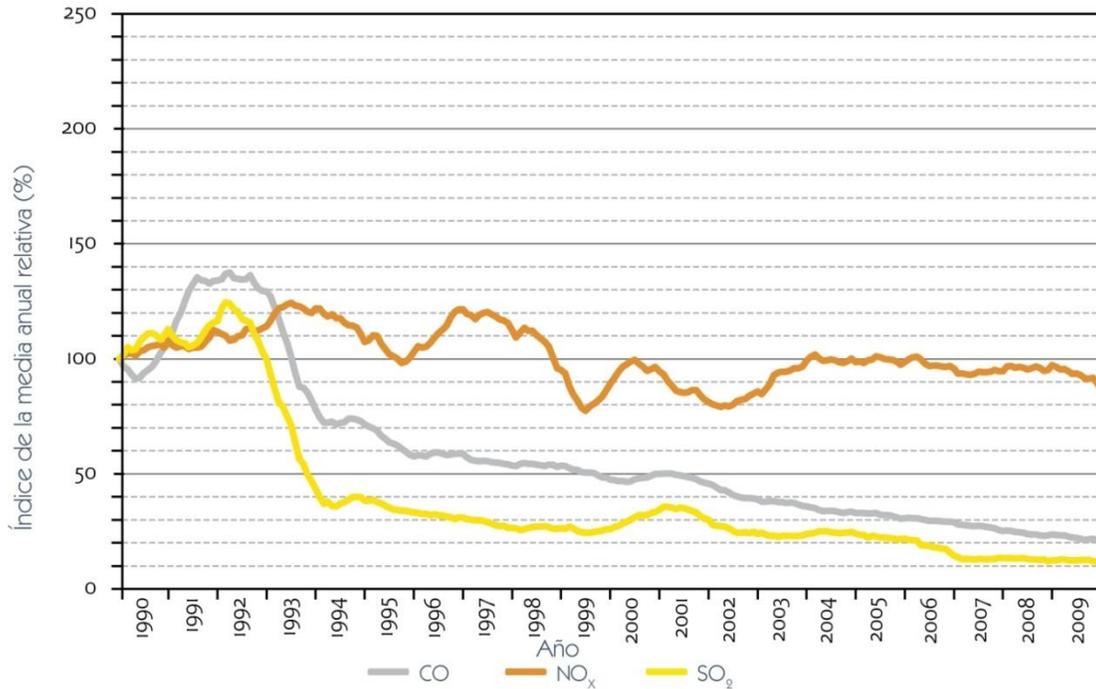
## **3.2 Tendencias y distribución de los contaminantes**

Se dice que un contaminante presenta una tendencia cuando la traza de su comportamiento sigue un patrón cuya dirección y sentido se mantienen sin cambios

drásticos a lo largo de un período dado. Por el contrario, se dice que no hay una tendencia cuando la variabilidad de las concentraciones no permite detectar un patrón específico de comportamiento. Un indicador utilizado para analizar la tendencia de los contaminantes es el *índice de la media anual relativa* que representa la tasa porcentual de cambio del promedio anual móvil con respecto al promedio de 1989, por ser el año justamente anterior a la entrada en vigor del primer paquete de medidas para mejorar la calidad del aire en la ZMVM. El índice se evalúa mes a mes para observar la tendencia como una serie de tiempo, donde el punto de partida corresponde a la concentración promedio anual de 1989 a la que se le asigna un valor de 100%. Cualquier punto de la línea de tendencia mayor al 100% indica un aumento en la concentración del contaminante, mientras que un valor menor representa una disminución del mismo.

La Gráfica 3.2.1 muestra las tendencias de los óxidos de nitrógeno, del monóxido de carbono y del dióxido de azufre, los cuales muestran una tendencia descendente.

**Gráfica 3.2.1. Tendencias del monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>) y dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) en el aire ambiente de la ZMVM 1990-2009**

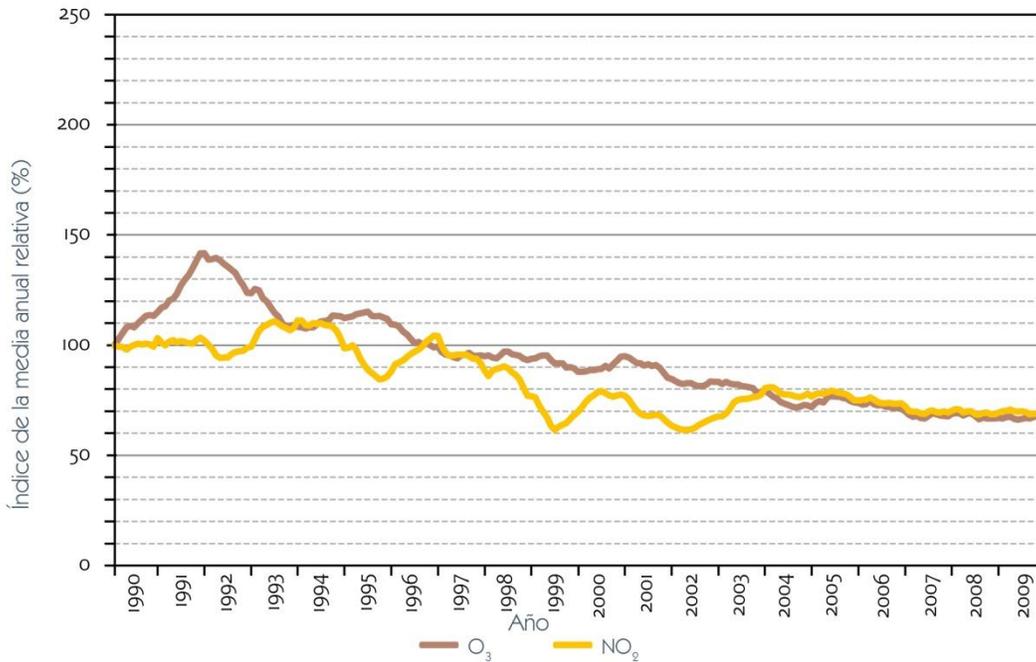


A pesar de la dificultad que implica la reducción de los contaminantes de origen secundario, el ozono y el dióxido de nitrógeno han mantenido una tendencia descendente en los últimos 15 años. En el caso particular del ozono la reducción de las concentraciones ha sido continua desde 1992, presentando hasta el año 2008 una disminución neta del 36% (Gráfica 3.2.2). En el caso del dióxido de nitrógeno se observa una línea con tendencia descendente y comportamiento cíclico durante los primeros 15 años, lo cual se estabiliza a partir de 2004. Al año 2008 se observa una disminución neta del 30% con respecto al año base. Comparando con 2007, el ozono y el dióxido de nitrógeno mantienen la tendencia descendente con una tasa de cambio de 2.0 y 0.1

por ciento, respectivamente, si bien como se puede observar en la gráfica estas tasas se han ido acercando a cero de 2007 a la fecha.

Este estancamiento, que también es claramente observable con el SO<sub>2</sub> y un poco menos con los NO<sub>x</sub>, es uno de los aspectos que permiten suponer que la generación de contaminantes atmosféricos en la ZMVM ha estado llegando a un piso estructural (en el Capítulo 6 se desarrolla un enfoque que aborda directamente este tema).

**Gráfica 3.2.2. Tendencias del ozono (O<sub>3</sub>) y el dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) en el aire ambiente de la ZMVM para el periodo 1990-2009**

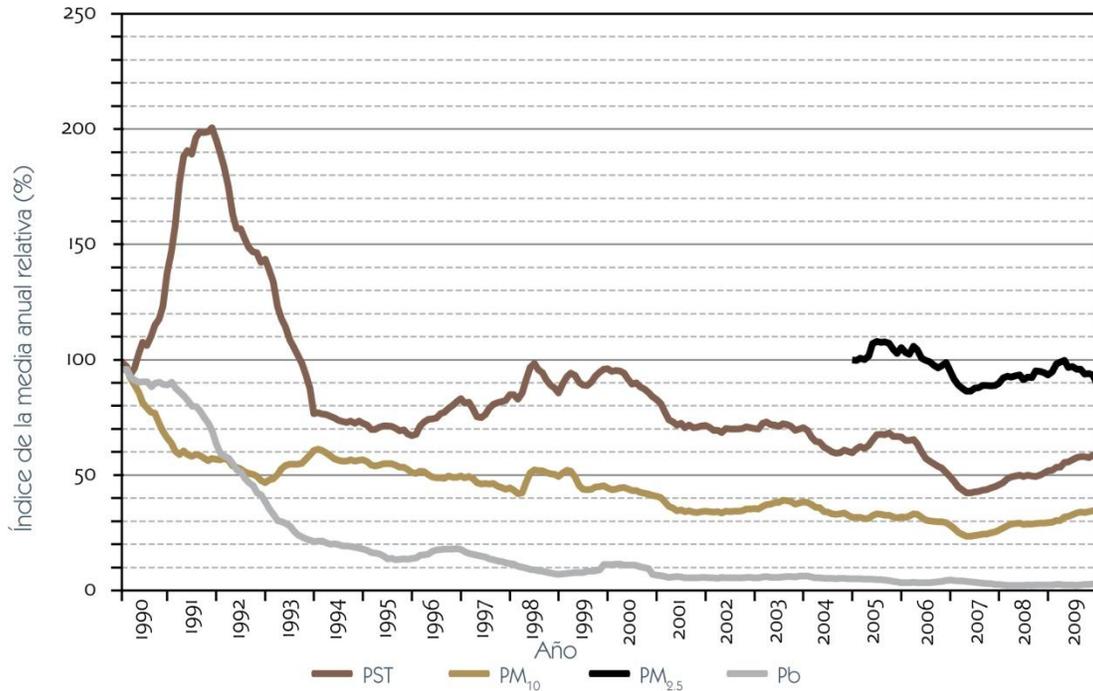


La tendencia de las partículas suspendidas totales presenta una gran variabilidad durante los primeros 10 años, la cual se vuelve claramente descendente a partir del año 2000. Durante el primer lustro de la década de 1990 se registraron cambios extremos en la concentración de las partículas suspendidas totales, con un incremento de más del 100% por encima de las concentraciones de 1989 y un descenso de más de 120% en los dos años siguientes (Gráfica 3.2.3). Entre 1996 y 2000 se observó un incremento en la concentración de partículas suspendidas totales con respecto a 1995.

Referente a las partículas menores a 10 micrómetros, la línea de tendencia indica una disminución progresiva en la concentración, es decir, en los últimos 19 años se ha logrado una reducción del 71% en la concentración del contaminante. Sin embargo, durante 2008 se registró un incremento del 3% en su concentración con respecto a 2007.

En el caso de las partículas menores a 2.5 micrómetros la tendencia se analiza con el promedio de 2004. Hasta 2008 la reducción neta es de 12%. Con respecto a 2007 la concentración se incrementó en 3%.

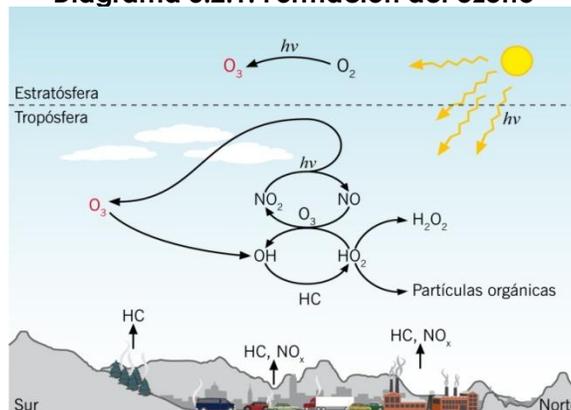
**Gráfica 3.2.3. Tendencias de las partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>), partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>) y plomo (Pb) en el aire ambiente de la ZMVM en el periodo 1990-2009**



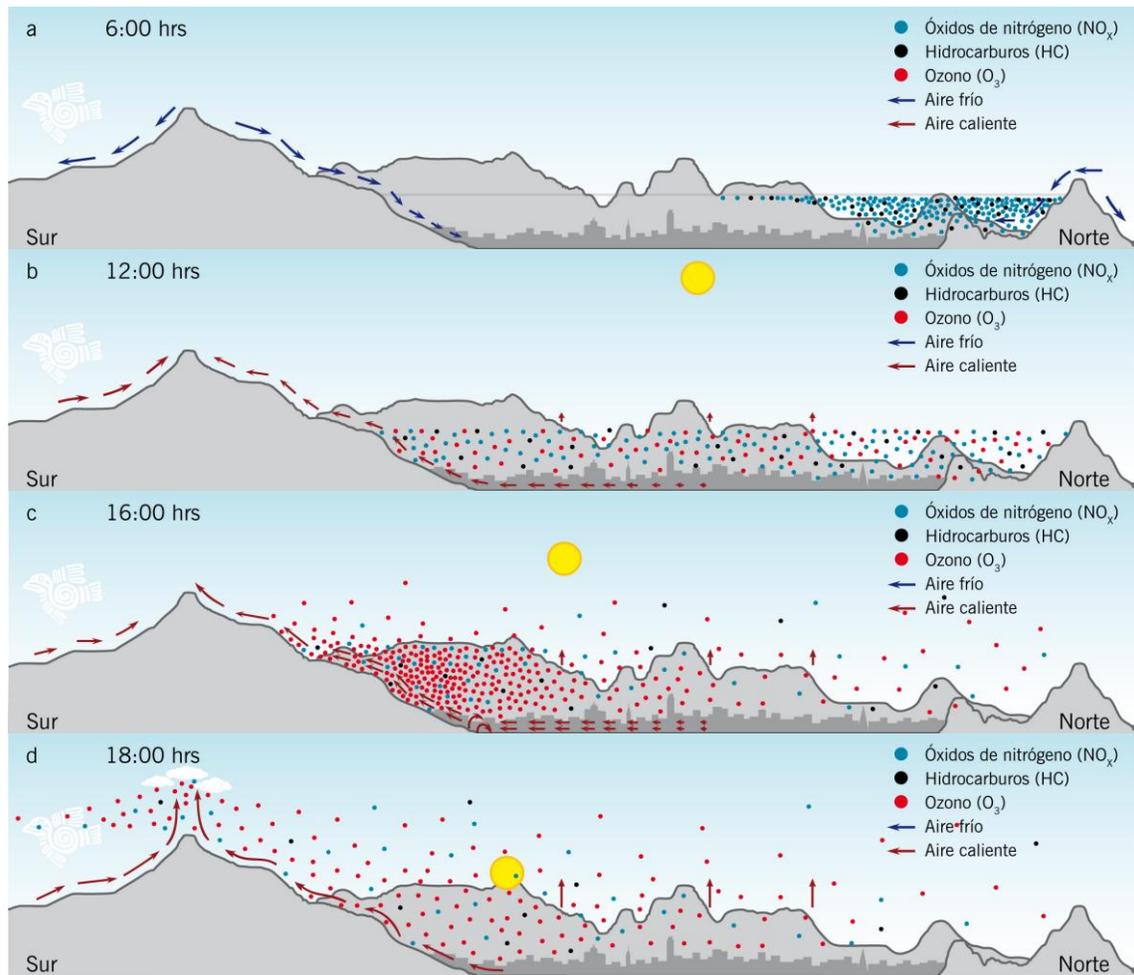
**Ozono**

La formación del ozono depende significativamente de las características del Valle de México. En efecto, la fisiografía de la región es una constante que desempeña un papel fundamental en el comportamiento de la contaminación por ozono, ya que las montañas influyen en el movimiento de los vientos y por lo tanto en los fenómenos de dispersión y acumulación de los contaminantes. Las condiciones meteorológicas de la región, a saber, la estabilidad atmosférica, los vientos débiles, el cielo despejado, la radiación solar, las inversiones térmicas y la ausencia de lluvia, favorecen asimismo las altas concentraciones de ozono. Los Diagramas 3.2.1 y 3.2.2a-d muestran esquemáticamente el proceso de formación del ozono y los fenómenos que definen las variaciones de las concentraciones horarias.

**Diagrama 3.2.1. Formación del ozono**



### Diagramas 3.2.2a-d. Esquemas de concentración horaria de contaminantes



Durante los meses de marzo a mayo son frecuentes los días despejados, con vientos escasos y con estabilidad atmosférica. Los días son más largos y en consecuencia hay más radiación solar. Los cielos sin nubes favorecen un rápido enfriamiento del suelo durante la noche, generando una capa de aire frío y denso cerca del suelo. Esta capa puede tener un grosor de algunos cientos de metros. El aire frío debajo de una capa de aire más tibio forma una inversión térmica.

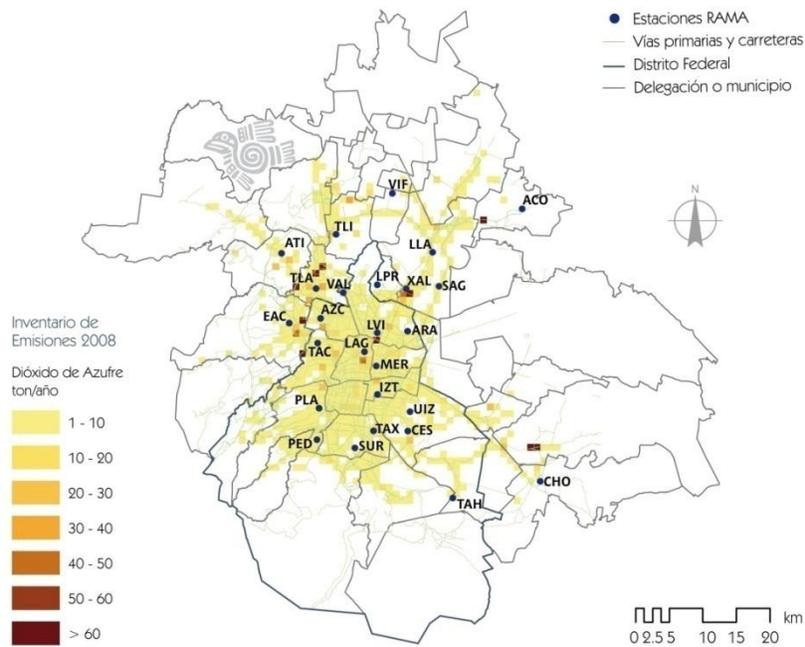
En las primeras horas de la mañana, con el inicio de las actividades urbanas, las emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno se acumulan lentamente sobre la metrópoli y son atrapadas dentro de la inversión térmica (Diagrama 3.2.2a). A medida que el sol calienta gradualmente el suelo favorece un flujo desde el Valle hacia las laderas de las montañas, que inicia con una débil corriente de aire que arrastra los contaminantes hacia las montañas del sur y poniente (Diagrama 3.2.2b), durante el desplazamiento la energía del sol activa las reacciones fotoquímicas que dan origen al ozono. Si existe estabilidad atmosférica en las capas atmosféricas superiores, el intercambio vertical de las masas de aire es lento y la contaminación se acumula gradualmente al pie de las montañas provocando un incremento importante en la concentración del ozono (Diagrama 3.2.2c). El calentamiento del suelo por la tarde refuerza el movimiento horizontal y vertical del viento favoreciendo la rápida dispersión de la contaminación (Diagrama 3.2.2d).



## Dióxido de azufre

El dióxido de azufre es emitido junto con los gases de combustión durante la quema de combustibles derivados del petróleo como la gasolina, diesel, gasóleo y el gas LP. La distribución espacial de las concentraciones de dióxido de azufre en el aire ambiente, estimada a partir de los datos del monitoreo atmosférico, presenta una correspondencia con la distribución de las emisiones del contaminante (Mapas 3.2.1 y 3.2.2 y Gráfica 3.2.6).

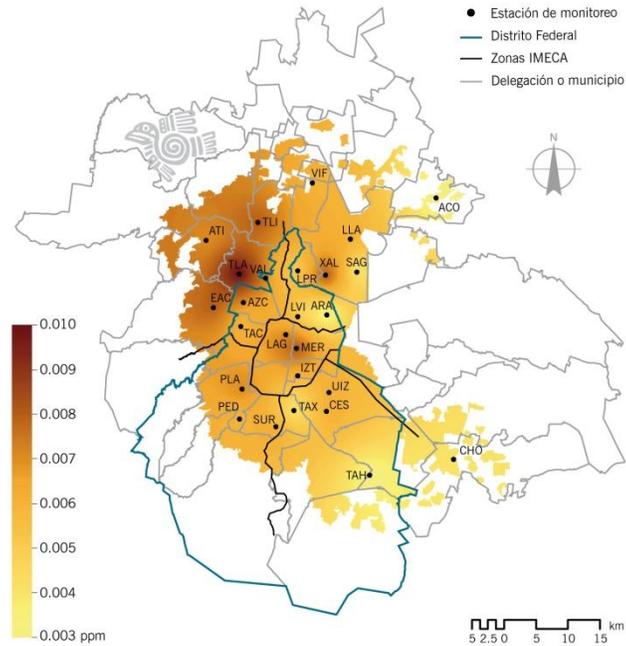
**Mapa 3.2.1. Distribución espacial de las emisiones de SO<sub>2</sub> en la ZMVM**



Fuente: Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM-2008.

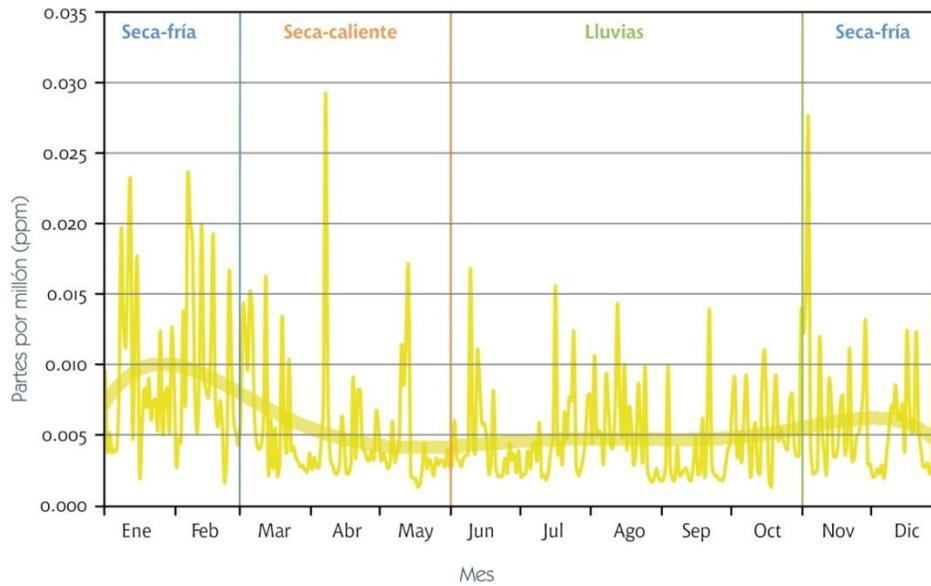
El comportamiento estacional del dióxido de azufre es diferente al del ozono, como se puede observar en la Gráfica 3.2.6. Nótese cómo el promedio diario es mayor en la época seca fría y alcanza los menores valores en la seca caliente.

**Mapa 3.2.2. Distribución espacial de la concentración de SO<sub>2</sub> en la ZMVM en 2009**



Nota: Estimada a partir de los datos del monitoreo atmosférico.

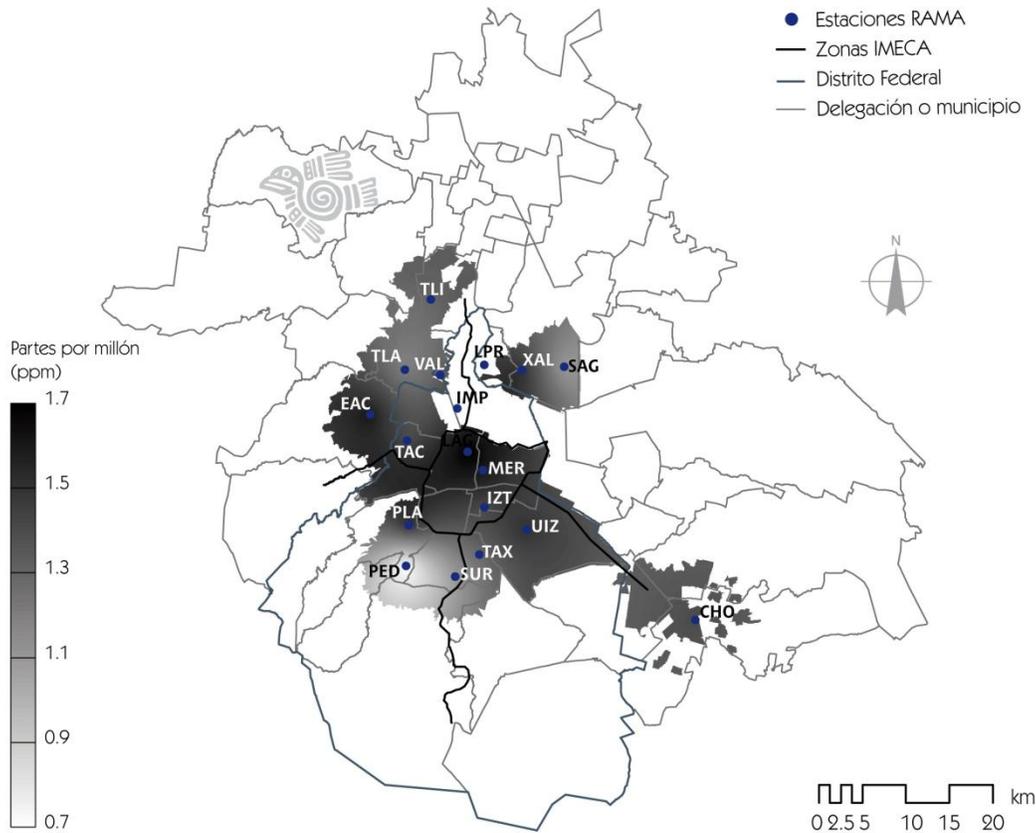
**Gráfica 3.2.6. Comportamiento estacional del promedio diario de la concentración de dióxido de azufre en la ZMVM durante 2009**



### Monóxido de carbono

En cuanto al monóxido de carbono, éste es producido durante la combustión parcial de hidrocarburos y materiales orgánicos. La concentración de monóxido de carbono en el aire ambiente está afectada directamente por la cercanía, distribución y aforo de las vialidades primarias y secundarias que cruzan la metrópoli. De acuerdo con los datos del monitoreo atmosférico las mayores concentraciones del contaminante se observan en el centro de la ZMVM, que es la región en donde se encuentra la mayor cantidad de fuentes de emisión (Mapa 3.2.3 y Gráfica 3.2.7).

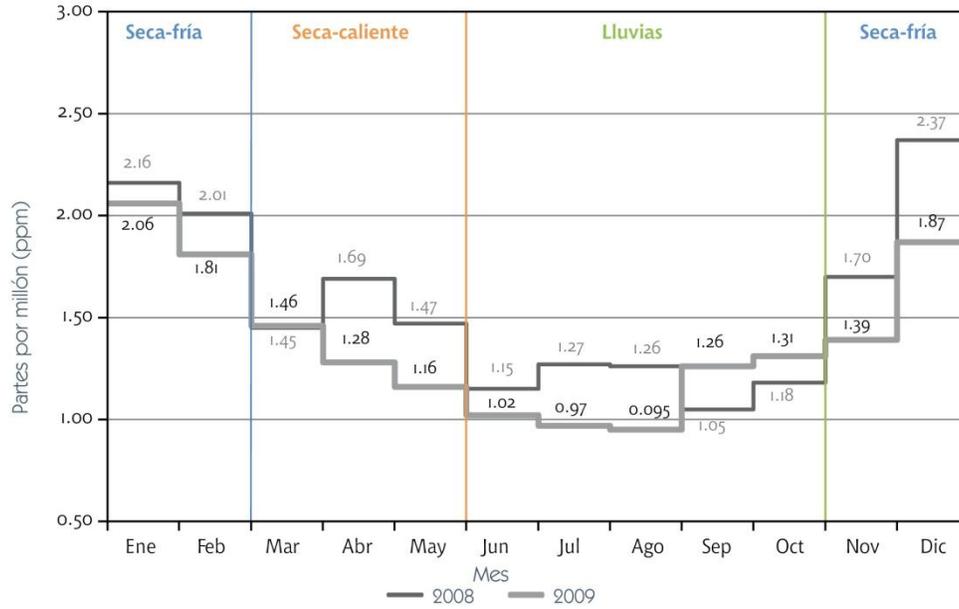
**Mapa 3.2.3. Distribución espacial de las emisiones de CO en la ZMVM**



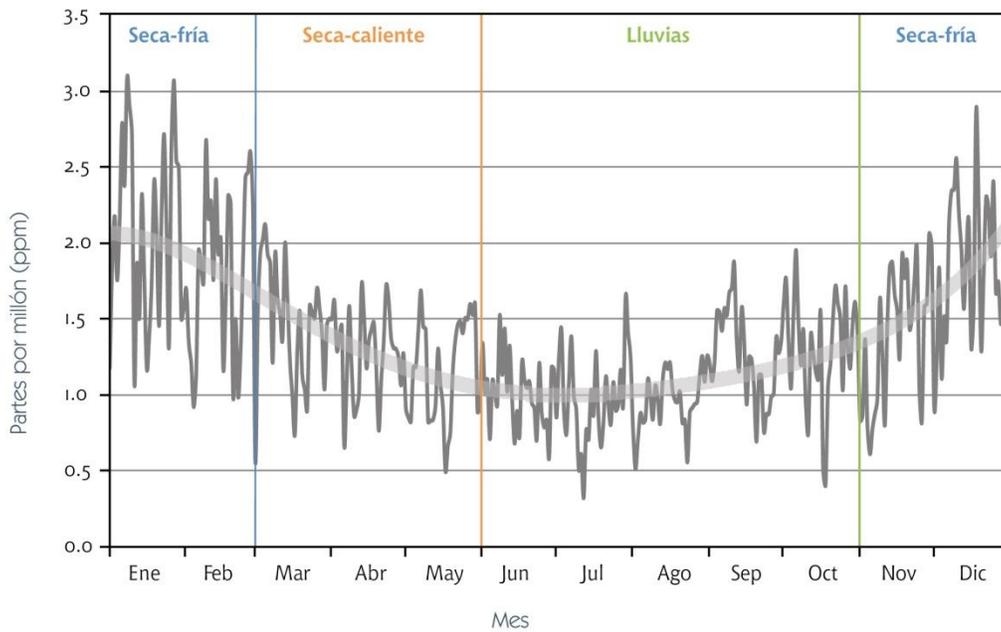
Fuente: Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM-2008.

En el caso del monóxido de carbono, se tiene una fuerte componente estacional con concentraciones bajas durante la época de lluvias y máximas durante la temporada seca, principalmente durante la temporada seca-fría. La distribución temporal del CO, a lo largo de 2009 (Gráfica 3.2.8) presenta un incremento durante los meses de invierno provocado por el estancamiento del aire debido a la disminución de la temperatura ambiente y el aumento en la frecuencia de las inversiones térmicas de superficie, que impiden el mezclado y la dispersión de los contaminantes.

**Gráfica 3.2.7. Concentración promedio mensual de CO en los años 2008 y 2009**



**Gráfica 3.2.8. Comportamiento temporal del promedio diario de la concentración de monóxido de carbono en la ZMVM durante 2009**

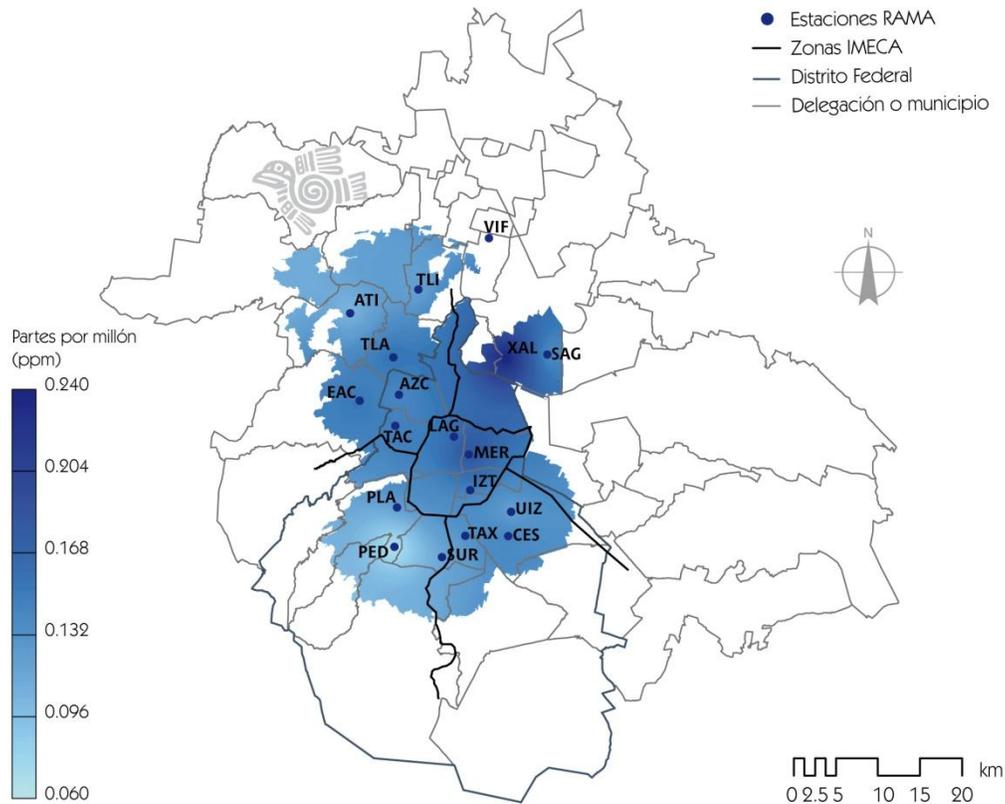


## Óxidos de nitrógeno

Los óxidos de nitrógeno, al igual que el monóxido de carbono, son emitidos principalmente por los vehículos automotores. La distribución espacial de este contaminante es similar a la del monóxido de carbono (Mapa 3.2.4 y Gráfica 3.2.9). Una fuente muy importante de óxidos de nitrógeno es la generación de energía eléctrica, la cual aporta alrededor del 6% del total de emisiones de la zona metropolitana. La distribución espacial de la concentración de los óxidos de nitrógeno en el aire ambiente está asociada directamente con la distribución espacial de las fuentes de emisión.

El noreste registra las concentraciones más altas del contaminante, es muy probable que las estaciones que se encuentran en esta región reciban la influencia de las emisiones de la zona industrial y el impacto de las emisiones de la termoeléctrica "Valle de México".

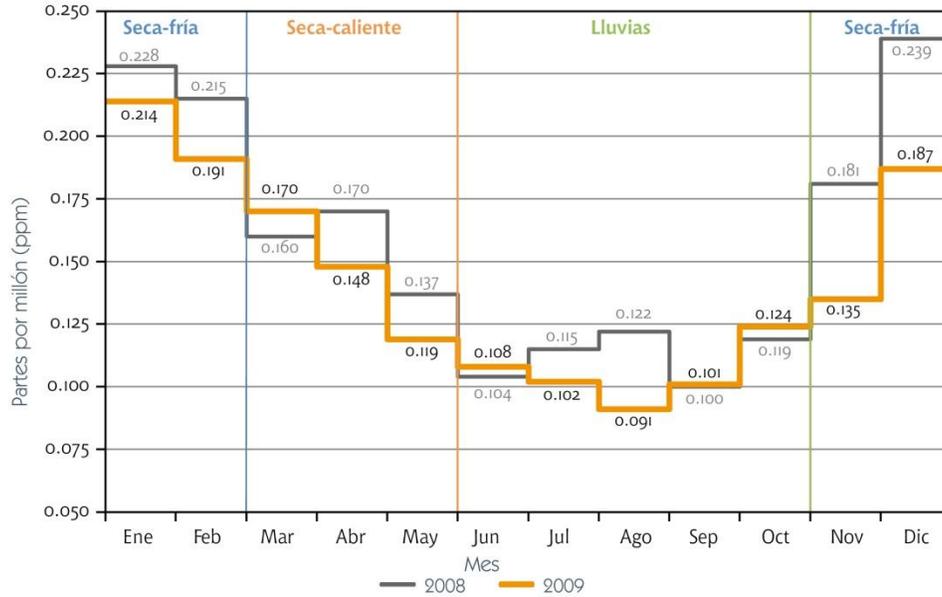
**Mapa 3.2.4. Distribución espacial de las emisiones de óxidos de nitrógeno en la ZMVM**



Fuente: Inventario de Emisiones de Contaminantes Criterio de la ZMVM-2008.

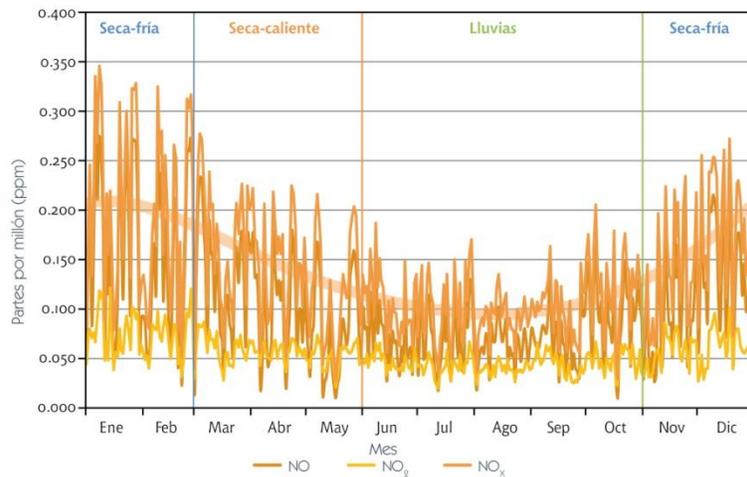
Al tener una fuente común, los óxidos de nitrógeno presentan una distribución temporal similar a la del monóxido de carbono, con un mínimo durante la temporada de lluvias y concentraciones máximas durante la temporada invernal.

**Gráfica 3.2.9. Concentración promedio mensual de NO<sub>x</sub> en los años 2008 y 2009**



Los picos de concentración de óxidos de nitrógeno se presentan de manera simultánea a los picos de concentración de monóxido de carbono (Gráfica 3.2.10). La meteorología, conjuntamente con el incremento en la intensidad de actividades comerciales y sociales que caracterizan al mes de diciembre, propician los aumentos en la emisión de monóxido de carbono y de los óxidos de nitrógeno. Adicionalmente, en el caso particular del NO<sub>2</sub>, se observa un aumento durante la temporada seca-caliente, entre los meses de abril y mayo, este incremento puede estar asociado con una mayor actividad fotoquímica atmosférica.

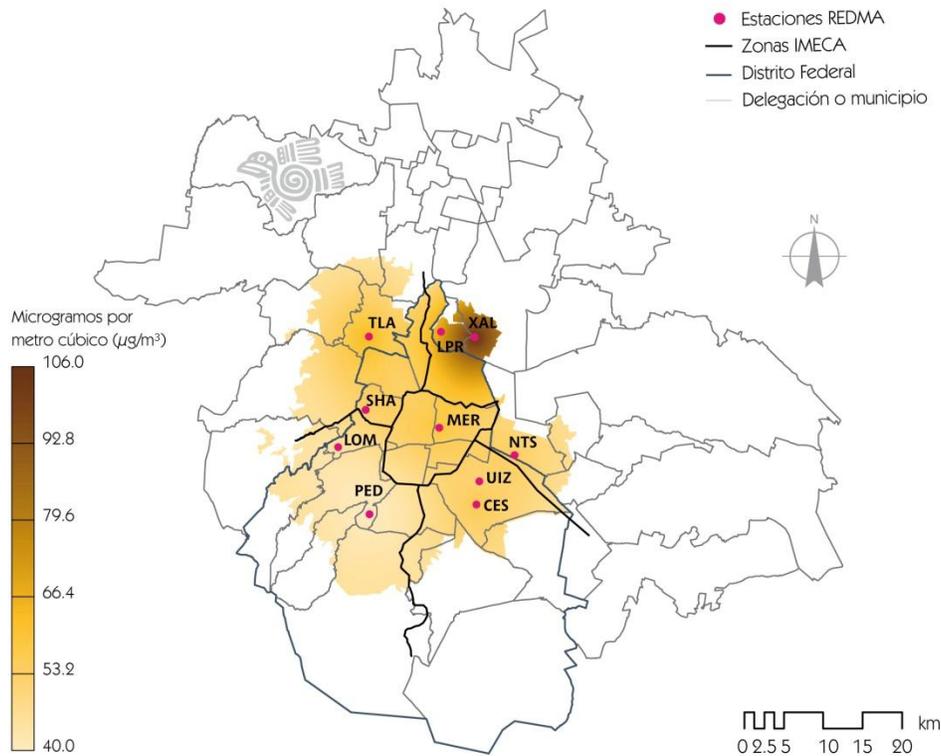
**Gráfica 3.2.10. Comportamiento temporal del promedio diario de la concentración de óxidos de nitrógeno, dióxido de nitrógeno y óxido nítrico en la ZMVM durante 2009**



### Partículas PM<sub>10</sub>

En la parte central de la ZMVM la emisión de partículas menores a 10 micrómetros se encuentra dominada por las fuente móviles, mientras en los alrededores la emisión de dichas partículas depende principalmente de las vialidades sin pavimentar y el polvo levantado del suelo erosionado del Ex Lago de Texcoco (Mapa 3.2.5). Más del 50% de la masa de las partículas corresponde a partículas provenientes del polvo del suelo, material resuspendido por las actividades de construcción o de tránsito vehicular y materiales de origen geológico. Estas partículas por su tamaño se sedimentan relativamente rápido y en condiciones de viento débil no suelen recorrer grandes distancias.

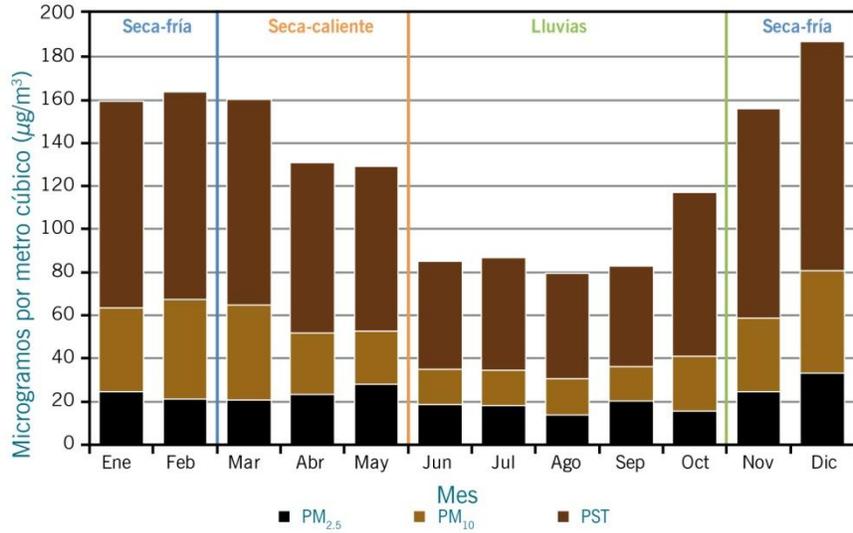
**Mapa 3.2.5. Distribución espacial de la concentración de partículas menores a 10 micrómetros en la ZMVM durante 2009**



En el caso de las partículas suspendidas se observa una distribución temporal consistente en las tres fracciones de partículas suspendidas medidas por el Sistema de Monitoreo Atmosférico. La Gráfica 3.2.11 muestra la concentración promedio mensual de partículas suspendidas totales (PST), partículas menores a 10 micrómetros (PM<sub>10</sub>) y partículas menores a 2.5 micrómetros (PM<sub>2.5</sub>).

Las partículas menores a 2.5 micrómetros tienen una distribución temporal distinta a la de las otras dos fracciones. Las partículas más pequeñas son removidas por la lluvia con una menor eficiencia que las partículas mayores, esto se observa como una menor reducción con respecto a los meses de la temporada seca. La naturaleza secundaria de las partículas finas es responsable de su incremento durante los meses de abril y mayo.

**Gráfica 3.2.11. Distribución temporal de las diferentes fracciones de partículas suspendidas medidas por el SIMAT durante 2008**

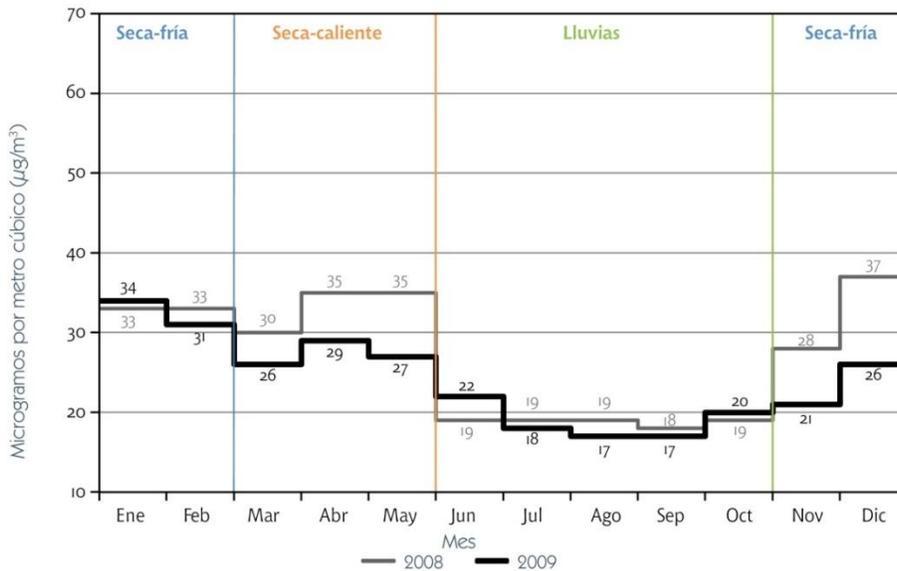


Nota: La altura de la barra representa la concentración promedio mensual de cada una de las fracciones.

**Partículas PM<sub>2.5</sub>**

Los mayores niveles de partículas menores a 2.5 micrómetros se observa en los meses de las temporadas seca-caliente y seca-fría, en marzo-abril y noviembre-diciembre, lo cual es provocado por un incremento en la intensidad fotoquímica en la atmósfera y por las condiciones meteorológicas que son favorables para la estabilidad atmosférica (Gráfica 3.2.12). Durante la temporada de lluvias la reducción en la concentración de los precursores y la disminución en la intensidad de la radiación solar reducen la concentración de esta fracción de las partículas.

**Gráfica 3.2.12. Concentración promedio mensual de PM<sub>2.5</sub> en los años 2008 y 2009**



### **3.3 Exposición de la población a la contaminación del aire en la ZMVM**

La exposición se define como el contacto de una persona o grupo de personas con un contaminante en un lugar y un tiempo específico (Monn, 2000). Cada contaminante tiene un potencial distinto para producir efectos en la salud humana, los cuales dependen de las propiedades fisicoquímicas, de la dosis asimilada y de la intensidad de la exposición. La realización de una evaluación adecuada de la exposición total de una población, requiere conocer el tipo y número de individuos que se encuentran expuestos, el lugar en donde se presenta la exposición, cómo se produce, la duración y el tipo de contaminantes.

Este proceso de evaluación de la exposición requiere del uso de elaboradas herramientas de análisis geoestadístico, del conocimiento del lugar donde se realiza la exposición, del tipo de contaminante, de los patrones específicos de emisión (en el caso de los contaminantes primarios), de la aplicación de modelos de dispersión y de receptores, de los registros de los patrones de las actividades diarias y del análisis e integración de los datos derivados del monitoreo en sitios fijos, complementados con datos del monitoreo en interiores y a nivel personal (Jensen, 1999).

La evaluación de la exposición es un proceso complejo y con un elevado costo, por esta razón es frecuente que se empleen como indicadores de la exposición los datos de la concentración de los contaminantes criterio, obtenidos por las redes de monitoreo en sus estaciones fijas. La información de las estaciones generalmente se emplea como sustituto de la concentración a la que se exponen los individuos. Sin omitir las limitaciones que ofrecen los datos provenientes del monitoreo en las estaciones fijas como indicadores de exposición, es posible realizar una evaluación del nivel de riesgo que enfrenta la población de la ZMVM al exponerse a los contaminantes que aún exceden los límites de las NOM: ozono y partículas menores a 10 micrómetros.

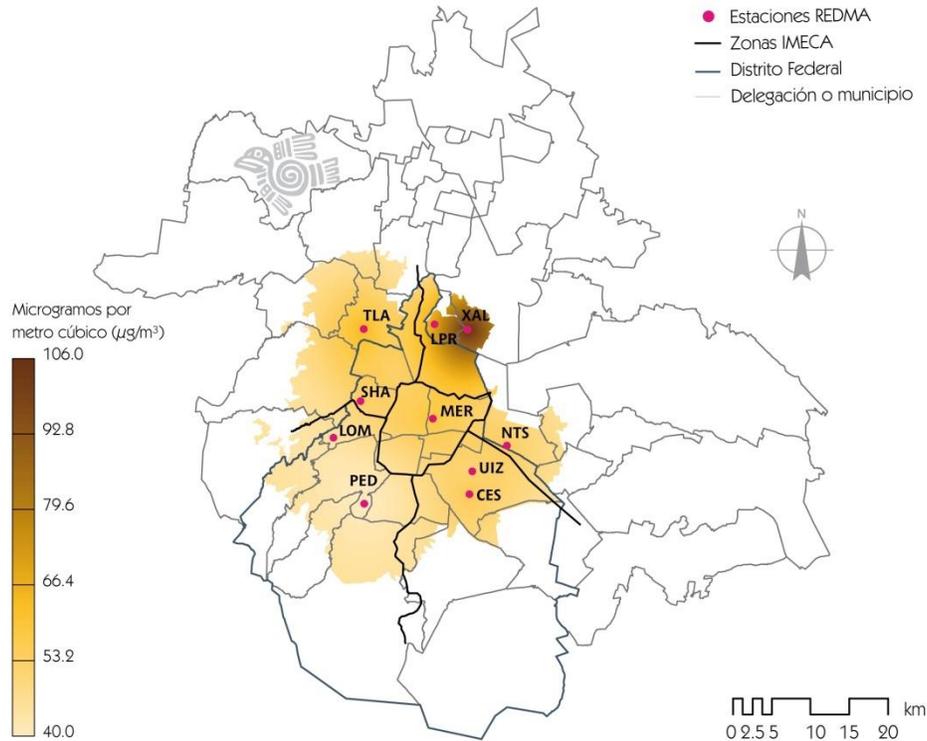
Los resultados que se presentan a continuación no cuantifican la relación dosis-respuesta de la población, ni estiman cuantitativamente el impacto en la morbilidad, sino que ofrecen información sobre el nivel de riesgo que enfrentan los habitantes de la metrópolis en función de la distribución espacial de los contaminantes e identifican a partir de la distribución de edad de la población, la cantidad de niñas, niños y adultos mayores expuestos (por ser los grupos que presentan mayor vulnerabilidad a la contaminación).

#### **Exposición a partículas suspendidas menores a 10 micrómetros**

En el Mapa 3.3.1, se muestra la distribución espacial de  $PM_{10}$  en la región con cobertura del SIMAT, siendo la región noreste de la ZMVM, la más afectada.

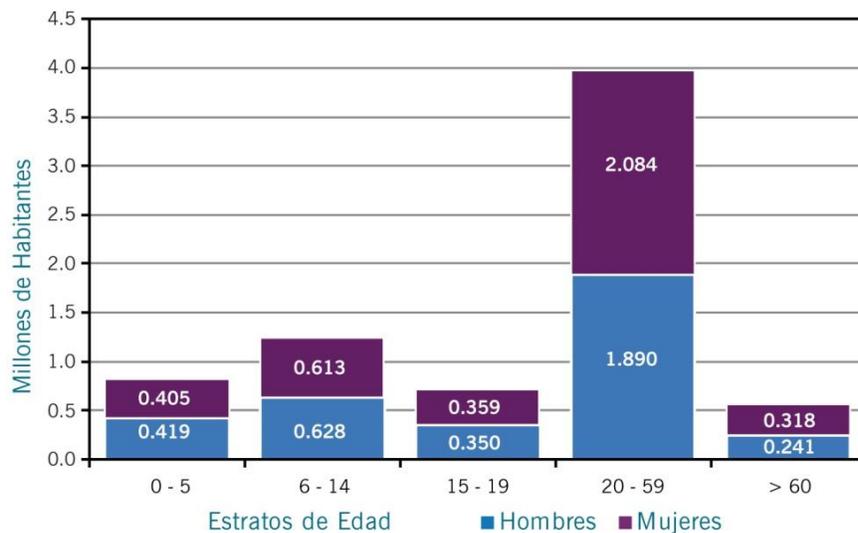
Los resultados indican que el 36% de la población (2.6 millones) que radica en zonas con más riesgo de exposición a partículas  $PM_{10}$ , está compuesta por individuos que se encuentran dentro de los grupos vulnerables (niños y adultos mayores). La Gráfica 3.3.1, muestra que este porcentaje está compuesto por 0.8 millones de niños menores a 5 años, 1.2 millones de niños entre 6 y 14 años, y alrededor de 0.6 millones de adultos mayores a 60 años.

**Mapa 3.3.1. Distribución espacial de la concentración promedio anual de PM<sub>10</sub> durante el año 2009**



Lo anterior es importante por dos razones: la evidencia existente sobre el daño que provoca la exposición de largo plazo en la salud humana y la asociación que tienen las partículas con la mortalidad.

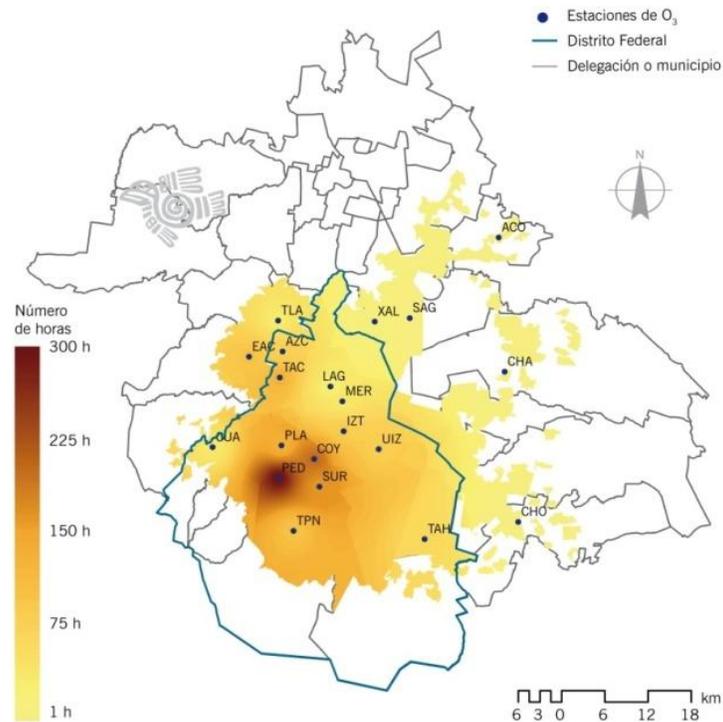
**Gráfica 3.3.1. Detalle de la población expuesta durante 2008 a una concentración mayor a  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub> por grupos de edad y género**



## Exposición al ozono

De los 15.7 millones de habitantes que se encuentran dentro de la región de cobertura de la red de monitoreo, alrededor del 61% tiene su domicilio en zonas donde la concentración de ozono excede la NOM más de 100 horas al año (Ver Mapa 3.3.2). Es decir, alrededor de 9.6 millones de habitantes se encuentran en regiones con riesgo de exposición.

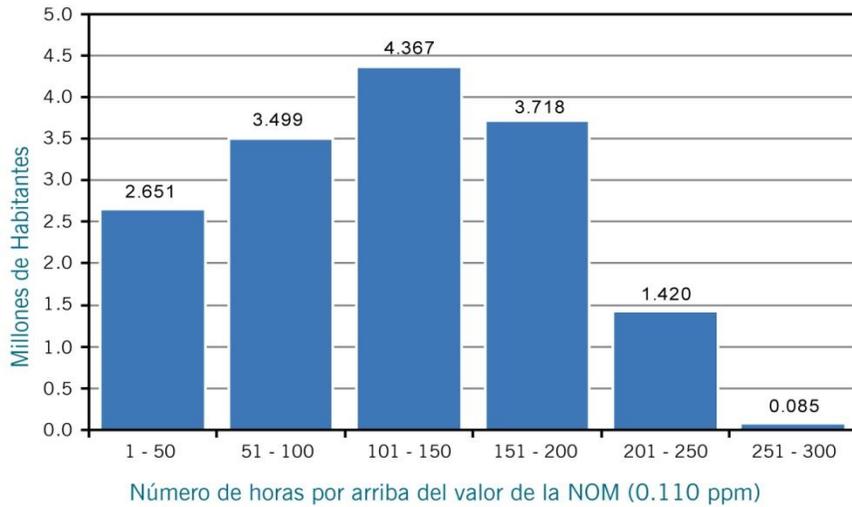
**Mapa 3.3.2. Distribución espacial del número de horas en las que se excedió el valor límite de la norma horaria de ozono en la ZMVM en 2009**



En la Gráfica 3.3.2, se indica el número de personas que radican en zonas en donde se excede la norma y se describe el número de personas en riesgo de exposición para diferentes intervalos de horas; prácticamente todos los habitantes de la ZMVM tienen el riesgo de exponerse a concentraciones por encima de la norma.

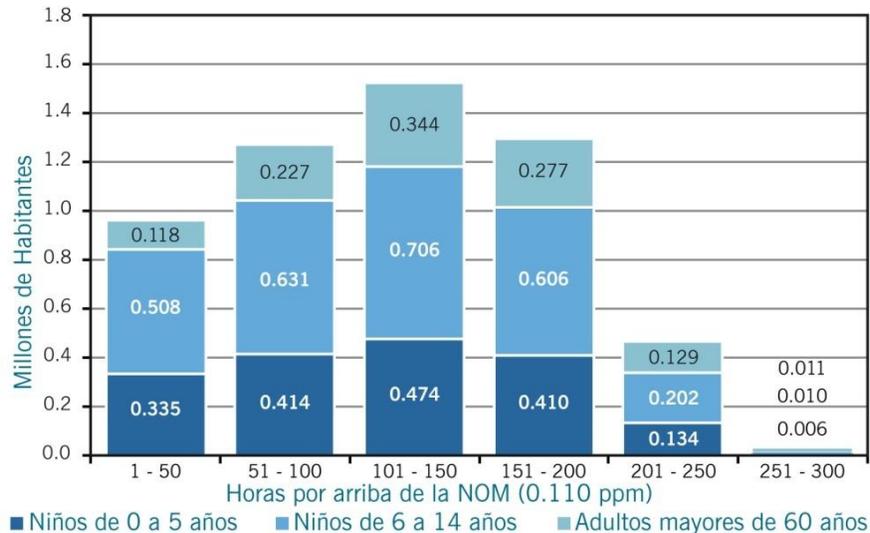
Los niños y los adultos mayores representan los grupos más sensibles a los daños por contaminación de ozono, por lo que es de particular importancia su identificación. Con base en la información del INEGI y las proyecciones que hizo CONAPO para 2008, se estima que alrededor de 1.8 millones de niños menores a 5 años y 1.1 millones de personas mayores a 60 años se localizan en zonas donde se excede la norma más de una vez al año. Alrededor de 1.4 millones de niños menores a 5 años y de 1 millón de adultos mayores a 60 años se encuentran en zonas donde la norma se excede en más de 100 horas al año y están en riesgo de exponerse a una concentración promedio de 0.125 ppm y concentraciones máximas entre 0.110 y 0.200 ppm de ozono.

**Gráfica 3.3.2. Número de personas que radican en zonas en las que se excede la norma de ozono, 2008**



En la Gráfica 3.3.3, se indica el número de niños y adultos mayores en riesgo de exposición para diferentes intervalos de horas por encima de la norma.

**Gráfica 3.3.3. Detalle de la población expuesta durante 2008 a una concentración mayor a 0.110 ppm de O<sub>3</sub>**



Es importante mencionar que al igual que en el caso de partículas menores a 10 micrómetros, una gran parte de la población en edad productiva realiza actividades en lugares diferentes al lugar de su domicilio y son los niños y adultos mayores los que permanecen más tiempo en su lugar de residencia.

### **3.4 Comportamiento de los contaminantes por día de la semana en la ZMVM**

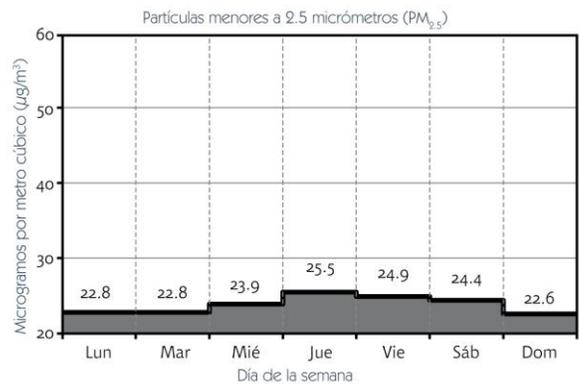
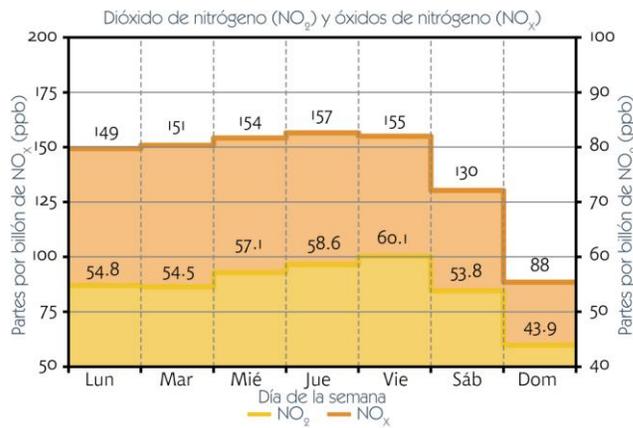
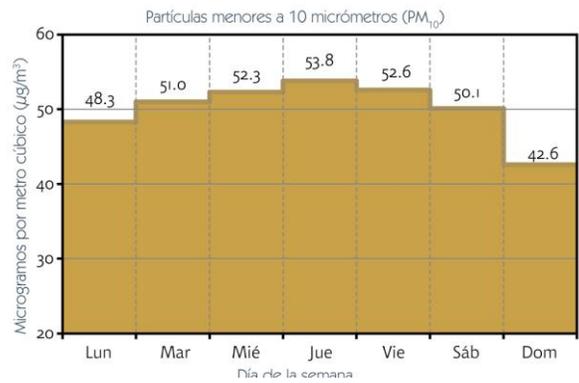
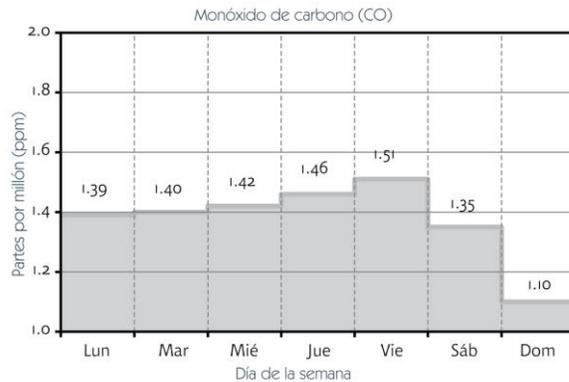
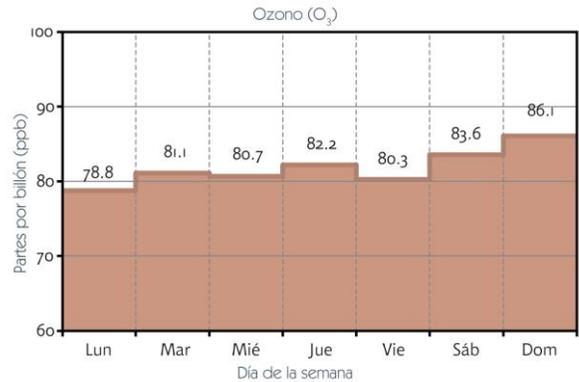
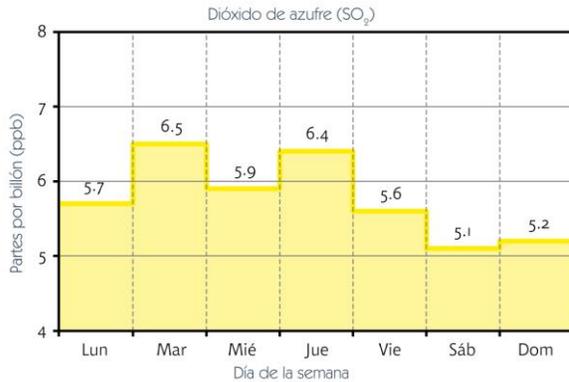
La información recabada por el SIMAT permite identificar una clara relación entre el día de la semana, los patrones de emisión y la concentración de los contaminantes. En el pasado reciente era común que los niveles de contaminación registraran concentraciones menores los sábados y domingos, en comparación con las concentraciones reportadas de lunes a viernes, presumiblemente debido a una disminución de las actividades de la industria y del uso de vehículos. Sin embargo, se ha observado un cambio gradual en los patrones de actividades en la ZMVM y, por lo tanto, en las emisiones.

Del comportamiento de los contaminantes primarios a lo largo de la semana se puede observar que el día domingo éstos reducen sus concentraciones en alrededor del 25% con respecto al resto de los días, lo cual refuerza la evidencia sobre la contribución de los vehículos automotores en las emisiones contaminantes (Gráficas 3.4.1). Ahora bien, en lo que se refiere a la acumulación de éstas, las observaciones denotan, en general, un incremento gradual en las concentraciones de monóxido de carbono, de óxidos de nitrógeno y de partículas menores a 10 µm a medida que avanza la semana, de lunes a viernes.

En lo que se refiere a los contaminantes secundarios, a saber ozono y partículas menores a 2.5 micrómetros, éstos exhiben un comportamiento diferente al observado en los contaminantes primarios. Contrariamente a lo que se esperaría ante una reducción de emisiones precursoras, las concentraciones de dichos contaminantes son similares o mayores durante el fin de semana que las reportadas de lunes a viernes. De hecho, en el caso del ozono, la concentración promedio del domingo es la más alta de la semana.

Lo anterior es congruente con el análisis de los datos de calidad del aire para la ZMVM entre 1986 y 2007 realizado por Stephens et al. (2008), donde reportan que generalmente el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y las partículas menores a 10 micrómetros se reducen en un porcentaje importante durante los fines de semana. Un hallazgo importante de este estudio fue el observar que para el ozono, los días del fin de semana se registraban concentraciones iguales o mayores que los reportados el resto de los días. Este fenómeno se ha estudiado ampliamente en otras ciudades del mundo y recibe el nombre de "efecto de fin de semana" (traducido del término *weekend effect*).

**Gráficas 3.4.1. Comportamiento de las concentraciones promedio por contaminante, distribuidas por día de la semana, en 2009**



### **3.5 Depósito atmosférico**

El depósito atmosférico es el proceso mediante el cual las partículas y los gases presentes en el aire se depositan sobre la superficie de la tierra. Estos gases y partículas pueden provenir de fuentes naturales como los incendios forestales, las emisiones volcánicas y la sal marina, o pueden provenir de las actividades urbanas, de la agricultura, de las emisiones de las plantas de generación de energía, de los vehículos automotores y otras actividades humanas. Cuando el depósito húmedo es ácido se conoce como precipitación ácida o más comúnmente como lluvia ácida (National Atmospheric Deposition Program, 1999). La lluvia ácida se mide en la ZMVM desde los años ochenta.

En condiciones naturales el agua de lluvia es ligeramente ácida y tiene un pH de 5.6. Esta acidez se debe a las pequeñas cantidades de dióxido de carbono que se encuentran en la atmósfera y que reaccionan con el agua para formar ácido carbónico. Cuando la lluvia tiene una acidez mayor que la normal (es decir un pH menor a 5.6) se considera como lluvia ácida.

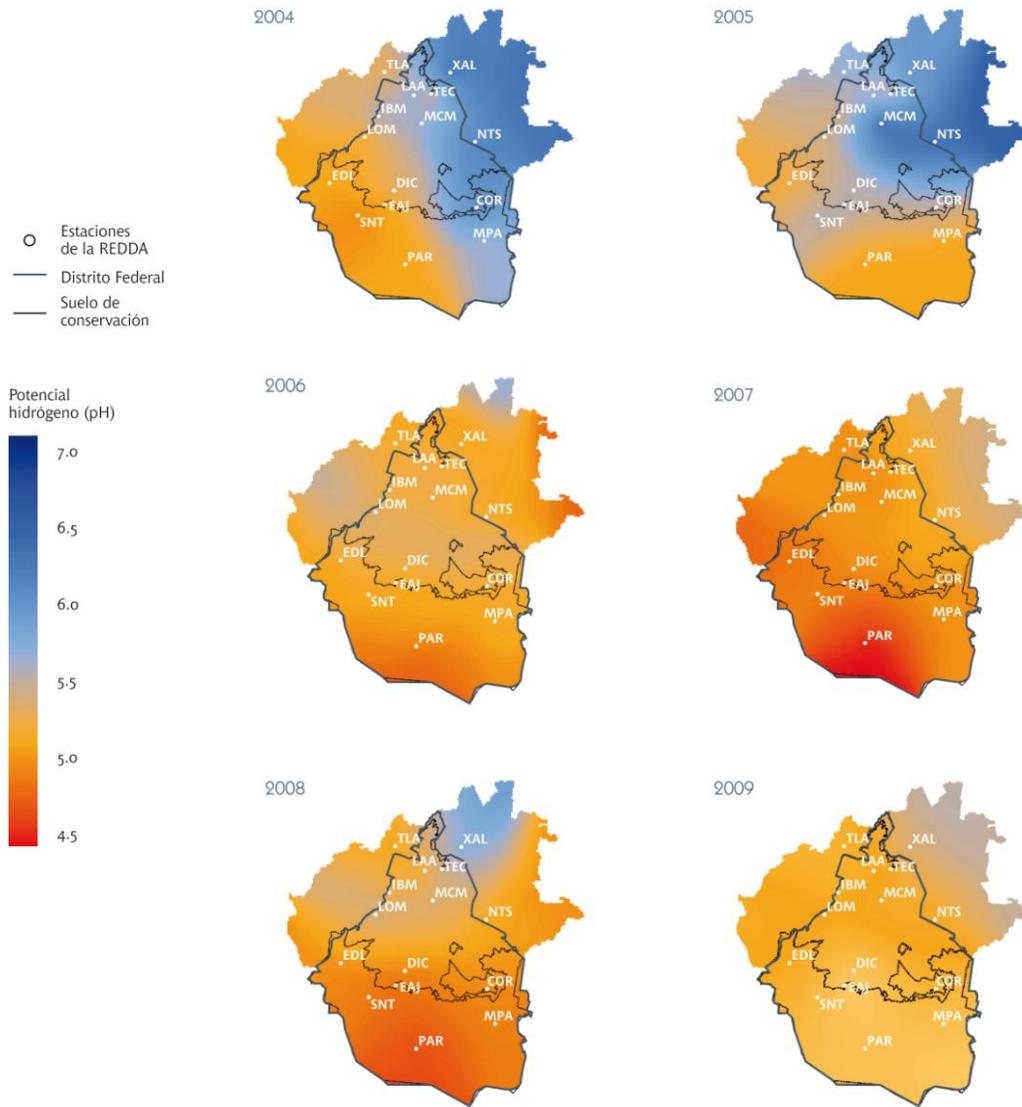
La lluvia ácida es diferente a otros tipos de contaminación del aire, no es emitida directamente por las chimeneas y los escapes, se forma de la combinación de los contaminantes gaseosos y el vapor de agua. El incremento en la acidez del agua de lluvia es consecuencia de las reacciones químicas en la atmósfera entre los óxidos de azufre ( $SO_x$ ), los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) y el agua. El nivel de acidez estará determinado principalmente por las cantidades emitidas de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, ácidos orgánicos y el balance con el amonio y cationes básicos.

La lluvia ácida no produce un daño evidente en la atmósfera pero sí en los lagos, ríos, arroyos, cultivos y ecosistemas. Su impacto es capaz de reducir la biodiversidad en los ecosistemas acuáticos y tiene el potencial de alterar la composición de las especies en los ecosistemas terrestres, además de provocar que las aguas superficiales se vuelvan más ácidas.

La precipitación ácida también perjudica los cultivos agrícolas al dañar las hojas y el suelo. En naciones desarrolladas el daño de la lluvia ácida en la agricultura se nulifica mediante el uso de fertilizantes que reemplazan los nutrientes disueltos y la aplicación de cal que es capaz de neutralizar los ácidos. Sin embargo, en países donde los agricultores no pueden utilizar estos remedios, la precipitación ácida y el incremento de la acidez del suelo tienen un efecto amplificado en sus cultivos.

En los Mapas 3.5.1, los tonos anaranjados indican la presencia de lluvia ácida, los tonos rojos indican las zonas en donde se registraron los valores más bajos de pH. En cada uno de estos mapas se indica el área correspondiente al suelo de conservación y la ubicación de las estaciones de monitoreo. Esta secuencia de imágenes muestra los cambios de la distribución espacial en la acidez del depósito húmedo, de 2004 a 2009.

**Mapas 3.5.1. Distribución espacial de la concentración ponderada anual de acidez del agua de lluvia en la región de la REDDA, durante los últimos seis años**



Fuente: SIMAT.

**3.6 Efectos de la contaminación atmosférica sobre la vegetación y cultivos en la ZMVM**

Las plantas también sufren daños generados por la contaminación atmosférica. Algunas veces no presentan síntomas visibles y otras muestran de manera clara la evidencia de que están siendo dañadas, ya sea a través de síntomas característicos o por aquéllos que pueden confundirse con los producidos por patógenos bióticos como virus, insectos o ácaros, así como por deficiencias o excesos de elementos nutritivos (De la Isla de Bauer, Ma. de L., 2009).

Los estudios realizados en los últimos años sobre los efectos de los contaminantes atmosféricos en la vegetación de la ZMVM presentan resultados inequívocos. En la Universidad Autónoma de Chapingo, se han detectado en los últimos años efectos negativos de los gases oxidantes en algunos cultivos en parcelas experimentales y especies ornamentales en jardines, como soya, frijol, dalia, *Pinus montezumae*, jamaica (*Hibiscus sp.*) y en ciertas plantas indicadoras.

En la zona del Desierto de los Leones se han detectado daños por ozono en árboles de cereza negra (Skelly et al, 1997) y en un trasplante controlado, en la misma zona, de *Usnea ceratina* Ach. y *Everniastrum neocirrhatum* llevadas desde un sitio ubicado a 100 km. de la ZMVM, se detectaron reducciones del 30% en la fotosíntesis neta máxima y del 18% en la degradación de clorofila b (Zambrano, 2000). La cadena de efectos derivados a partir del daño producido por los contaminantes atmosféricos en la vegetación, así como sus relaciones con otros fenómenos como el depósito atmosférico, siguen siendo motivo de investigaciones en curso. En general, los principales fitotóxicos detectados son el SO<sub>2</sub>, flúor, fluoruros y O<sub>3</sub>.

### **3.7 Estudios y análisis recientes sobre calidad del aire de la ZMVM**

A continuación se presentan los principales resultados de estudios e investigaciones que resultan de relevancia para sustentar el enfoque de varias de las medidas que se presentarán más adelante.

#### **Campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006**

La información de este apartado se tomó del resumen ejecutivo del estudio "Análisis y síntesis de los resultados de las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 para su uso en la formulación de estrategias en materia de cambio climático y contaminación local en la ZMVM", preparado para el INE por MCE2, 2009.

El informe de los estudios realizados en los años 2003 y 2006 indica que cada vez más se tiene mayor evidencia de que las actividades humanas están modificando tanto la calidad del aire como el clima, pasando por la escala urbana y regional hasta la escala continental y mundial, de tal forma que se identifican al rápido crecimiento demográfico y a la mayor demanda energética, como las principales fuerzas que impulsan los cambios ambientales sin precedentes que se presentan.

La mayor parte del crecimiento ocurre en las regiones urbanas y en sus áreas conurbadas, lo que ha conducido a la formación de las megaciudades, que son áreas urbanas con más de 10 millones de habitantes.

El informe menciona que los asentamientos densamente poblados pero bien planificados y administrados pueden reducir la necesidad de realizar cambios en el uso del suelo, a la vez que proporcionan infraestructura y servicios. Sin embargo, muchas áreas urbanas sufren de una expansión acelerada y sus actividades son la causa principal de los problemas ambientales. Estos megacentros de población humana llevan a incrementar la demanda de energía, la actividad industrial y los requerimientos de transporte, lo cual aumenta la emisión de contaminantes a la atmósfera.

La redistribución geográfica de contaminantes, la evolución de sus propiedades químicas, físicas y ópticas, y los mecanismos para su eventual remoción de la atmósfera

son muy complejos y obviamente muy importantes, aún cuando en la actualidad se tiene un conocimiento limitado de los mismos.

MILAGRO (Megacity Initiative: Local And Global Research Observations) es el primer proyecto de colaboración internacional enfocado en caracterizar la exportación de contaminantes atmosféricos generados en megaciudades. La ZMVM fue seleccionada como caso de estudio para caracterizar las fuentes, concentraciones, transporte, y procesos de transformación de los contaminantes emitidos a la atmósfera y para evaluar los impactos regionales y globales de estas emisiones.

Las investigaciones anteriores sobre la contaminación del aire en la ZMVM generaron el marco ideal para la planeación de MILAGRO, en particular la Campaña MCMA-2003, coordinada por el Programa Integral sobre Contaminación del Aire Urbano, Regional y Global en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (Massachusetts Institute of Technology, MIT), y auspiciada por la Comisión Ambiental Metropolitana del Valle de México (CAM) y la Fundación Nacional de la Ciencia (National Science Foundation, NSF) de los Estados Unidos, para actualizar y mejorar el inventario de emisiones, así como el conocimiento de los procesos químicos, de dispersión y transporte de los contaminantes emitidos hacia la atmósfera de la ZMVM. La Campaña MCMA-2003 se llevó a cabo en abril del 2003, que es la temporada del año cuando los procesos fotoquímicos son más intensos. En esta campaña se instrumentó un supersitio de medición y se utilizó también un laboratorio móvil para realizar mediciones en varios puntos de la ZMVM.

El objetivo del estudio fue identificar y proponer elementos técnicos y científicos que contribuyeran al diseño de estrategias y programas para reducir los impactos locales de la contaminación atmosférica en la ZMVM y su contribución en las emisiones globales a partir de la revisión exhaustiva y la sistematización de la información generada durante las campañas de mediciones MCMA-2003 y MILAGRO-2006. Los objetivos particulares fueron:

- Evaluar los resultados de las investigaciones científicas de las Campañas MCMA-2003/MILAGRO y sus impactos locales, regionales y globales.
- Evaluar la influencia de las fuentes de emisión ubicadas en la zona industrial de Tula en la calidad del aire de la ZMVM.
- Analizar la sensibilidad de los impactos del aumento de temperatura en la producción de contaminantes secundarios en la ZMVM.

Las Campañas MCMA-2002/2003 realizadas en febrero de 2002 y abril del 2003 proporcionaron mediciones detalladas de muchos oxidantes precursores de ozono y de productos fotoquímicos intermedios incluyendo radicales, así como de datos meteorológicos y de emisiones (Molina et al., 2007). La realización del proyecto MILAGRO tuvo lugar en marzo del 2006 e involucró a más de 450 científicos de 150 instituciones de 30 países, la cual se dividió en cuatro componentes que fueron llevados a cabo simultáneamente:

1) La Campaña MCMA-2006 (Mexico City Metropolitan Area – 2006) investigó las emisiones y concentraciones de contaminantes de la superficie dentro de la ZMVM, así como su transporte y transformación, y sus efectos en la salud humana.

2) La Campaña MAX-Mex (Megacity Aerosol Experiment: Ciudad de México) se enfocó a la formación y los cambios en la composición de los aerosoles de la megaciudad de

México durante su transporte, y en cómo la naturaleza química y física de éstos afecta los coeficientes radiativos de dispersión y de absorción.

3) La Campaña MIRAGE-Mex (Megacity Impacts on Regional and Global Environments - Mexico) investigó las transformaciones químicas y físicas de los gases y partículas en la pluma de contaminantes producida por la ZMVM, como caso de estudio para analizar los impactos de las megaciudades en el clima y en la composición atmosférica regional y global.

4) La Campaña INTEX-B (Intercontinental Chemical Transport Experiment-Phase B) fue una campaña completamente integrada y diseñada para estudiar el transporte y transformación de gases y aerosoles en escalas transcontinentales e intercontinentales, así como para analizar su impacto en la calidad del aire y el clima.

La fase de mediciones de la Campaña MILAGRO consistió en utilizar una amplia gama de instrumentos en superficie, aeronaves y satélites, los cuales pueden usarse en su totalidad para rastrear la evolución de la pluma urbana cuando ésta se mezcla con la atmósfera regional de fondo.

Los principales hallazgos de estas campañas han sido publicados en dos ediciones especiales de MCMA-2003 y de MILAGRO/INTEX-B en la revista científica Química y Física Atmosférica (Atmospheric Chemistry and Physics, ACP), así como en otras revistas arbitradas sobre ciencias atmosféricas y ambientales. Una lista de publicaciones como resultado de las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO-2006 se proporciona en el Apéndice C del informe del estudio<sup>1</sup>.

A continuación se presentan los principales hallazgos de las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO 2006:

#### *a) Meteorología y dinámica*

- Las observaciones y los estudios de modelación muestran que en la mayoría de las condiciones, la exportación de los contaminantes desde la cuenca de la ZMVM es relativamente rápida y la acumulación de los contaminantes de días anteriores no es un factor relevante en la fotoquímica del Valle.
- Las condiciones sinópticas generales y las circulaciones del viento de la capa límite fueron similares a aquellas reportadas por estudios anteriores de la ZMVM y consistentes con estudios previos de climatología, lo que sugiere que los resultados obtenidos en MILAGRO son aplicables a las condiciones generales de la ZMVM.
- Las mediciones meteorológicas en superficie y a cierta altitud junto con mediciones de gases traza y aerosoles, indican que el transporte a escala sinóptica de la pluma de contaminantes de la ZMVM fue predominantemente hacia el noreste, aunque circulaciones en escala regional transportaron contaminantes hacia los valles y cuencas de los alrededores en algunos días.
- A escala de la cuenca, por la mañana los vientos del norte transportaron la pluma hacia el sur. En algunos días, la pluma fue transportada sobre el borde de la cuenca o a través del paso de las montañas en el sureste. Un flujo por la tarde

---

<sup>1</sup> La lista completa de los artículos elaborados por los investigadores de las campañas se encuentra disponible de manera electrónica en el sitio del Molina Center: <http://mce2.org/publications.html>.

desde el sur invirtió la dirección del flujo en el paso de las montañas del sureste y contribuyó a la ventilación de la pluma de la ZMVM hacia el noreste.

- Mediciones de equipos Lidar en superficie y sobre plataformas aéreas, así como mediciones meteorológicas, mostraron la presencia de múltiples capas de partículas, resultado de procesos de mezclado complejos sobre la región centro del país.
- Las emisiones de contaminantes durante la noche tienen impactos fuertes en el transporte y la acumulación de contaminación en la cuenca, causando altas concentraciones de contaminantes.
- Se encontró que plumas generadas por quema de biomasa se transportan a la ZMVM desde cuencas de los alrededores y regiones periféricas.
- El volcán Popocatepetl tiene impactos muy limitados en la calidad del aire de la ZMVM debido a la elevación de sus emisiones y a la estratificación vertical de los flujos de vientos. Sin embargo, estos impactos pueden ser mayores a escala regional.
- Las trayectorias de globos meteorológicos controlados encontraron la presencia de capas múltiples de la pluma urbana, persistente hasta el Golfo de México, con transporte muy rápido a grandes altitudes.
- Los modelos meteorológicos a mesoescala capturaron las características principales del transporte por el viento de la cuenca y fueron lo suficientemente exactos como para ayudar en el análisis e interpretación de datos.
- La combinación de los análisis de perfiles de viento con radares y los estudios de modelación ayudaron a identificar las posibles fuentes de área de metales pesados; sin embargo, podrían realizarse análisis adicionales para identificar a éstos de manera más precisa.

#### *b) Emisiones de gases y partículas de la ZMVM*

- El estudio MILAGRO demostró la sinergia de utilizar múltiples técnicas de análisis y plataformas e instrumentos para evaluar los inventarios de emisiones y reducir las incertidumbres asociadas. El proceso combinado ayuda a reducir las incertidumbres asociadas en las estimaciones de emisiones y provee una guía para determinar prioridades para el mejoramiento y refinamiento de los inventarios de emisiones.
- Los estudios de emisiones confirmaron que los vehículos con motor de combustión interna juegan un papel muy importante en el aporte de NO<sub>x</sub> y de COV, precursores en la fotoquímica extremadamente activa de la ZMVM. Estos vehículos de la ZMVM producen cantidades abundantes de partículas primarias, carbono elemental, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) adheridos a partículas, monóxido de carbono y una gran variedad de contaminantes atmosféricos tóxicos, tales como formaldehído, acetaldehído, benceno, tolueno y xilenos.
- Varios estudios demostraron que las emisiones de los vehículos a gasolina en la ZMVM han disminuido en los años recientes, el CO en particular, pero todavía los vehículos son los principales contribuyentes de emisiones de la ZMVM.
- La contribución relativa de los vehículos a diesel en los niveles generales de NO<sub>x</sub> es mayor, parcialmente, debido al incremento del consumo de diesel y a la introducción de tecnologías efectivas para el control de las emisiones en los

vehículos a gasolina, la cual ha ido mejorando más rápidamente que las tecnologías de control de emisiones en los vehículos a diesel.

- Algunas diferencias identificadas entre las observaciones durante MILAGRO y las estimaciones de emisiones móviles del inventario incluyeron: una leve sobre estimación de CO y NO, (<30% y <20%) y una probable subestimación de entre 1.4 a 1.9 en los COV en el inventario de emisiones. Existe evidencia observacional y de modelación de que las estimaciones actuales de emisiones de partículas se encuentran severamente subestimadas.
- Las mediciones directas en la torre de flujo del sitio SIMAT, ubicado en el centro de la ciudad sugieren que los estimados de emisiones de CO<sub>2</sub> en el inventario, olefinas, COV aromáticos y algunos compuestos oxigenados, son correctas para las emisiones de fuentes de combustión, pero sobreestiman las emisiones evaporativas de fuentes de área en la escala de varios kilómetros que comprenden las mediciones. En contraste, las mediciones realizadas por aeronaves indican una subestimación de emisiones de tolueno y benceno en el inventario de emisiones para el sector industrial en el noreste de la ZMVM.
- Las mediciones de flujo realizadas en la superficie y desde el aire demostraron que las técnicas de covarianza turbulenta en combinación con sensores de respuesta rápida pueden ser utilizados para evaluar directamente los inventarios de emisiones que de otra manera no sería posible con otro método de evaluación indirecto, haciendo de éstas técnicas, herramientas importantes para mejorar los procesos de manejo de la calidad del aire.
- Debido a las incertidumbres en las estimaciones actuales de las emisiones de PM en los inventarios de emisiones, es importante caracterizar de una mejor forma las contribuciones de partículas de las fuentes de emisiones móviles (diesel y gasolina) en la ZMVM.
- Las fuentes de emisión tales como el comercio informal y la preparación de alimentos en la calle necesitan caracterizarse. Los resultados muestran que existe el potencial de impactos severos locales en la calidad del aire por la preparación de alimentos y la quema de basura, ya que éstos pueden ser una fuente importante de gases reactivos y partículas finas.
- Las emisiones provenientes de múltiples fuentes urbanas e industriales pueden tener una influencia importante en los niveles de mercurio (Hg) en la atmósfera de la ZMVM. Sin embargo, otras especies no tratadas en esta revisión (e.g., NH<sub>3</sub>, polvo, metales) justifica la realización de estudios adicionales en la ZMVM.

### *c) Compuestos orgánicos volátiles: fuentes y concentraciones*

- Los estudios han proporcionado una mejor comprensión de las fuentes y las cargas atmosféricas de COV, incluyendo la primera detección espectroscópica de glioxal en la atmósfera y un análisis de la fracción alta de formaldehído en aire ambiente proveniente de fuentes de emisión primarias.
- La evaporación de combustible y las emisiones industriales son fuentes importantes de COV aromáticos en la cuenca.
- El uso de GLP continúa siendo una fuente importante de alcanos de bajo peso molecular.
- Las emisiones de varios hidrocarburos son mayores en la ZMVM que en las principales ciudades de los Estados Unidos de Norteamérica, debido al amplio

uso de GLP y a las altas emisiones industriales y evaporativas de compuestos aromáticos en la ZMVM.

- La reactividad total de los radicales hidroxilo (OH) formados a partir de COV en la ZMVM continúa siendo muy parecida a los resultados del estudio realizado en 2003; sin embargo, la distribución por especies es un poco diferente: el estudio más reciente encontró que el formaldehído y el acetaldehído son las dos especies más importantes de COV medidas en cuanto a la reactividad del radical OH.
- Los aldehídos son los componentes más importantes de la reactividad en las masas de aire expedidas por la ZMVM. Estos compuestos son producidos por la oxidación de los COV en la atmósfera, y algunos también son emitidos directamente. A pesar de su importancia, estos compuestos no se miden aún rutinariamente.
- Las variaciones diurnas de las concentraciones sugieren que la formación fotoquímica de COV secundarios es muy importante en la ZMVM.
- Los incendios forestales son una fuente modesta de COV en cuanto a mediciones a nivel de superficie.
- La fotoquímica rápida transforma la distribución de la reactividad COV/OH, de ser dominada en la ZMVM en un principio por los hidrocarburos no-metano durante la mañana, a ser dominada por COV oxigenados a cierta altura y viento abajo.
- Existen fuentes muy grandes de metanol en la cuenca de la ZMVM que no son de origen biogénico.

#### *d) Fotoquímica urbana y regional*

- Las concentraciones medidas de radicales OH y HO<sub>2</sub> en la ZMVM fueron más altas que las simuladas durante la mañana cuando los NO<sub>x</sub> son altos, lo que sugiere que posiblemente existen fuentes significativas de radicales que no se han tomado en cuenta en los modelos actuales de química de la atmósfera.
- La fotólisis del ácido nitroso (HONO) y del formaldehído (HCHO) así como la ozonólisis de alquenos son fuentes importantes de radicales en la ZMVM, mientras que la fotólisis de ozono contribuye en menor medida a la producción total de radicales. Al incluir las fuentes heterogéneas de HONO mejora substancialmente la comparación entre las concentraciones medidas y observadas de HONO y HO<sub>x</sub> y se incrementa la producción de O<sub>3</sub> y aerosoles orgánicos secundarios (SOA).
- La tasa neta instantánea de producción de ozono a partir de radicales HO<sub>2</sub> así como la tasa observada de producción de ozono por todos los mecanismos conocidos se encuentran dentro de las más altas observadas en otras regiones.
- Diversos modelos químicos de transporte y análisis de mediciones indican que la producción de ozono en la ZMVM es generalmente limitada por COV.
- A escala regional, los incrementos significativos de O<sub>3</sub> sobre niveles de fondo fueron observados en plumas que pudieron ser originadas en la ZMVM, con indicaciones de que la producción de O<sub>3</sub> ocurrió durante el tiempo de transporte de la pluma.

- La producción regional de O<sub>3</sub> parece ser sensible a NO<sub>x</sub> así como a COV y CO, con la reactividad regional de radicales OH dominada por compuestos orgánicos oxigenados y CO.
- Se encontró que la exportación a escala regional de nitrógeno reactivo de la ZMVM se lleva a cabo principalmente a través de la formación de nitratos de peroxiacetilo (PANs), los cuales pueden descomponerse térmicamente, llevando a la regeneración de NO<sub>x</sub> y contribuyendo a la formación regional de O<sub>3</sub>.
- La quema de biomasa tiene una influencia significativa en la química regional, contribuyendo con más de la mitad del aerosol orgánico y alrededor de un tercio del benceno, nitrógeno reactivo y monóxido de carbono, de las emisiones de la región.
- En Tenango del Aire, los indicadores del impacto de ozono en la salud humana y en ecosistemas, se excedieron de manera significativa durante la campaña MILAGRO. Las excedencias a la Norma Oficial Mexicana, NOM-020-SSA1-1993, en sus valores de una hora y de ocho horas, así como el índice acumulativo AOT40, indican el alcance regional de la contaminación atmosférica de la ZMVM hacia la región centro del país y la producción de ozono fuera de las áreas de emisión de contaminantes primarios.
- El paso de montaña hacia Tenango del Aire juega un importante papel en la calidad del aire en la ZMVM y la región. La sensibilidad de las parcelas de aire en Tenango con base en el indicador fotoquímico O<sub>3</sub>/NO<sub>x</sub> fue en general hacia los NO<sub>x</sub> indicando el paso de parcelas envejecidas típicas de ambientes rurales en las que el procesamiento de los NO<sub>x</sub> fue prácticamente completo.
- Las áreas agrícolas en la región Chalco-Ameca Ameca-Cuautla actúan como fuente de partículas PM<sub>10</sub>, cuya intensidad e impacto en la ZMVM, también depende de las interacciones sinópticas y de mesoescala.

#### e) *Partículas en el aire ambiente*

- Durante el estudio, las concentraciones de PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> en el área urbana fueron alrededor del doble de las concentraciones encontradas en áreas rurales circundantes a la ZMVM.
- Las partículas PM<sub>2.5</sub> constituyeron cerca de la mitad de las concentraciones de PM<sub>10</sub>, con pequeñas cantidades de masa en el rango PM<sub>2.5</sub> - PM<sub>1.0</sub>.
- La materia mineral contribuyó aproximadamente con el 25% de las PM<sub>10</sub> y 15% y 28% en promedio a las partículas PM<sub>2.5</sub> en áreas urbanas y rurales, respectivamente. Aproximadamente 25% de las partículas PM<sub>2.5</sub> son iones orgánicos secundarios, con el remanente de la masa de PM<sub>2.5</sub> formada principalmente de aerosoles carbonáceos.
- Durante este estudio, excepto por mediciones a nivel de superficie en sitios de muestreo en el centro de la ZMVM, la eficiencia de absorción de la masa de carbón elemental fue relativamente constante en mediciones realizadas en plataformas aéreas y a nivel de superficie.
- Aunque existen diferencias entre los diferentes métodos de atribución de fuentes, los resultados fueron consistentes en las conclusiones sobre las fuentes dominantes de aerosoles carbonáceos, que fueron los aerosoles orgánicos secundarios (SOA), la quema de biomasa y las emisiones vehiculares (hollín).

- El efecto de la quema de biomasa sobre el flujo de aerosoles desde la región hacia afuera, fue mucho mayor que sobre las concentraciones superficiales dentro de la ZMVM.
- Durante la Campaña MCMA-2003 y de nuevo en 2006, se observó que durante las horas con radiación solar, los aerosoles orgánicos secundarios crecen mucho más rápidamente de lo que los modelos atmosféricos actuales o experimentos de simulación en el laboratorio pueden explicar con los precursores esperados.
- La formación de SOA a partir de precursores primarios semivolátiles y compuestos volátiles intermedios, tiene el potencial de explicar la diferencia entre las mediciones y predicciones de SOA. Sin embargo, estas predicciones se encuentran limitadas por los datos y mediciones, por lo que son necesarias mediciones más específicas en campañas futuras.
- Los SOA biogénicos transportados desde las regiones costeras contribuyen con alrededor de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  a las concentraciones en la ZMVM.
- Los alquenos antropogénicos contribuyen poco a la masa de SOA, pero contribuyen indirectamente al reaccionar para producir radicales que también reaccionan con otros COV precursores de SOA.
- Es necesario realizar estudios adicionales para cuantificar las fuentes de carbono recientemente emitido en aerosoles orgánicos durante períodos de baja quema de biomasa.
- Se encontró que el aerosol orgánico primario (POA), proveniente de fuentes antropogénicas y de la quema de biomasa, era semivolátil, mientras que el aerosol orgánico secundario era menos volátil que el POA, y que el SOA envejecido era básicamente no-volátil, en discrepancia con los modelos actuales.
- Las tasas de formación de partículas formadas en la ZMVM fueron muy altas y se encontró que estaban formadas de compuestos orgánicos nitrogenados, ácidos orgánicos, y ácidos orgánicos hidroxilados, con sólo una fracción pequeña de sulfatos en los aerosoles.
- Se pueden hacer buenas predicciones de los núcleos de condensación de partículas (CCN) suponiendo un mezclado interno después de algunas cuantas horas de envejecimiento fotoquímico, lo cual ocurre en escalas más pequeñas que las de los modelos globales.

*f) Propiedades ópticas y mediciones remotas en superficie de aerosoles*

- En los sitios a nivel de superficie, los albedos de dispersión simple estuvieron frecuentemente en intervalos de 0.7-0.8 con algunos valores matutinos mucho menores. Esto es consistente con la presencia de concentraciones de aerosoles altamente absorbentes provenientes de la quema de combustibles fósiles y de biomasa.
- La contribución de los aerosoles provenientes de la quema de biomasa contienen tanto hollín como compuestos orgánicos oxidados, lo que aumentó la absorción de radiación UV. Esta observación indica que actividades de quema de biomasa pueden tener impactos importantes en la absorción o calentamiento por aerosoles carbonáceos en escalas urbanas (de megaciudades) así como regionales.

- Los compuestos orgánicos oxidados de incendios forestales y aquellos de formación secundaria tuvieron una absorción fuerte en la región del espectro de 300-400 nanómetros, lo que lleva a un aumento de la absorción óptica por estos aerosoles, por encima de lo anticipado por el carbono negro exclusivamente.
- Las mediciones del albedo de la superficie y de la reflectividad en la ZMVM mostraron que muchas de las superficies urbanas son más reflejantes que lo asumido en algoritmos de recuperación de satélites, y que el uso de una reflectividad visible de la superficie más grande en los algoritmos puede utilizarse para obtener una estimación exacta de la profundidad óptica de aerosoles (AOD).

#### *g) Estudios de salud*

- Estos estudios indican que las fuentes locales de contaminación atmosférica juegan un papel predominante en los efectos agudos observados en las poblaciones estudiadas y en los efectos tóxicos evaluados in vitro. Sin embargo, todavía existen huecos para entender la participación relativa que tienen las interacciones entre los contaminantes localmente emitidos y aquellos que son transportados de fuentes más lejanas, en los efectos crónicos sobre la salud de las poblaciones expuestas.

#### *h) Investigaciones futuras*

- La fracción de contribución de polvo a las partículas debido a la resuspensión en carretera no está clara, en contraste con las fuentes naturales. Existe la necesidad de caracterizar las fuentes regionales de polvo y las características del suelo para estas regiones, no sólo para el Valle de México, sino para toda la meseta central de México.
- Es importante el impacto de las reacciones químicas de las partículas con compuestos en fase gaseosa, por ejemplo, para el consumo de nitrato en forma de polvo grueso, pero se requiere seguir investigando éste aspecto para alcanzar un entendimiento cuantitativo, incluyendo la modelación en tres dimensiones.
- La identificación de las fuentes industriales de metales y aerosoles orgánicos y de las fuentes de cloruro urbanas sigue siendo poco clara.
- El análisis cuantitativo de alta resolución temporal para el análisis de polvo y de metales puede proporcionar información muy útil para la identificación del origen de las partículas.
- Se encontró que el inventario de emisiones 2006 de la ZMVM subestima las PM<sub>2.5</sub> primarias y se recomienda ser actualizado con la información proveniente de MILAGRO y otros estudios.
- Las PM<sub>2.5</sub> provenientes de incendios forestales parecen ser subestimadas por un orden de magnitud en el inventario oficial un inventario basado en satélites usando modelación en 3 dimensiones sobreestima las emisiones alrededor de dos veces al parecer por los incendios ocurridos fuera de la ZMVM.
- El impacto de algunas fuentes de aerosoles orgánicos primarios, tales como cocinar alimentos, el uso de biocombustibles y la quema de basura a cielo abierto puede ser importante, por lo cual se recomienda realizar estudios para su caracterización.

- Algunas diferencias en la distribución de las partículas de la quema de biomasa entre las diferentes aproximaciones fueron observadas y requieren de mayor investigación, ya que estas técnicas en conjunto representan técnicas avanzadas en el aporte de las fuentes.
- Las diferencias en la oxidación relativa de aerosoles orgánicos en las zonas urbanas frente a las muestras de fondo, obtenidas mediante técnicas diferentes, requieren de mayores investigaciones.

*i) Impactos de la región de Tula y del volcán Popocatepetl en la calidad del aire de la ZMVM*

La zona de Tula-Tepeji se localiza a una distancia de aproximadamente 60 kilómetros al norte de la ZMVM y se encuentra diametralmente opuesta al volcán Popocatepetl. Entre las grandes industrias que existen en la zona se incluyen la refinería Miguel Hidalgo, la Termoeléctrica Francisco Pérez Ríos y la industria cementera. Existen además otras industrias como la de alimentos y la textil. Existen en la zona también minas a cielo abierto y actividades agrícolas que pueden ser fuentes importantes de material particulado y de contaminantes gaseosos en la región. Las actividades industriales de la zona de Tula-Tepeji generan una carga importante de emisiones contaminantes a la cuenca atmosférica que pueden impactar la calidad del aire de la región. Los contaminantes emitidos tienen también el potencial de impactar tanto localmente como regionalmente a la población expuesta y a los ecosistemas circundantes.

Los análisis de los datos obtenidos durante las Campañas MCMA-2003 y MILAGRO/MCMA- 2006 han mostrado que las emisiones industriales en la región de Tula pueden llegar a impactar los niveles de calidad del aire de la ZMVM. En particular, los impactos pueden ser significativos en parte porque las emisiones de algunas de las fuentes emisoras más importantes de la región pueden llegar a ser mucho más elevadas que las que se encuentran dentro de la ZMVM. Sin embargo, la cuantificación precisa de la magnitud y de la extensión espacial de los impactos depende fuertemente de los patrones de transporte y condiciones meteorológicas (e.g., los campos de viento y su interacción con la topografía, deposición húmeda, mezclado vertical, etc.) antes, durante y después de la ocurrencia de los eventos de emisión.

En el estudio, las mediciones de SO<sub>2</sub> y los datos meteorológicos obtenidos durante MILAGRO en marzo de 2006 y una campaña en octubre-diciembre 2008, junto con las mediciones de largo plazo obtenidas por el SIMAT y las observaciones satelitales, fueron evaluadas para identificar las fuentes de las plumas de SO<sub>2</sub> observadas en la ZMVM y su transporte. Se utilizaron simulaciones numéricas y análisis estadísticos para estimar la magnitud y las características de los impactos de las emisiones de SO<sub>2</sub> del complejo industrial de Tula y del volcán Popocatepetl en la calidad del aire de la ZMVM. Ambos procedimientos, la modelación y los análisis estadísticos, son complementarios y permiten estudiar los impactos tanto en forma episódica como en largo plazo.

Los hallazgos más importantes del estudio de las emisiones de la región de Tula fueron los siguientes:

- El corredor industrial Tula se encuentra a lo largo de la trayectoria donde durante la noche hay flujos de salida que transportan los contaminantes atmosféricos hacia la ZMVM. Estos flujos de aire tienen bajas velocidades y bajas alturas de mezclado, lo que significa que pueden causar grandes impactos en la contaminación de la ZMVM. Esto es importante tanto en términos de impactos

regulares de la contaminación atmosférica y en términos de planeación y prevención de desastres.

- Los flujos de las emisiones de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CO}$  y de  $\text{NO}_x$  provenientes de algunas de las fuentes industriales más importantes en la región de Tula han sido estimados por varios grupos recientemente. En general, los resultados concuerdan con la magnitud de los flujos de emisión estimados entre los varios métodos utilizados. Sin embargo, parte de las diferencias encontradas en los resultados reportados pueden explicarse con: 1) las incertidumbres asociadas con las técnicas de estimación utilizadas; y, 2) la variabilidad de corto plazo intrínseca de los procesos de producción en las fuentes industriales de emisión. Además, es importante mencionar que los flujos de emisión durante la noche no han sido estimados por dichos estudios. Todo esto sugiere que hay que tomar con cautela la extrapolación de los flujos estimados para la evaluación de los inventarios anuales de emisiones.
- Aunque existen evidencias de variabilidad de largo plazo que sugieren que las emisiones de  $\text{SO}_2$  de la zona industrial de Tula han decrecido paulatinamente en los últimos años; está también claro que en la región de Tula existen fuentes industriales importantes que pueden potencialmente contribuir a deteriorar la calidad del aire regionalmente. Por ello, es importante mantener un programa constante de mediciones de contaminantes clave en la región.
- Las simulaciones que incluyeron tanto las emisiones de Tula como las del volcán Popocatepetl mostraron que los impactos en los niveles en superficie de  $\text{SO}_2$  en la ZMVM están fuertemente ligados a los patrones de los vientos predominantes. En ese sentido, la habilidad para cuantificar con precisión los impactos en sitios receptores dentro de la ZMVM depende en gran medida en la capacidad de los modelos meteorológicos para simular adecuadamente las características de dispersión y de transporte de contaminantes dentro de la cuenca. En general, se encontró que durante los periodos de simulación, alrededor de la mitad de los impactos en las concentraciones de  $\text{SO}_2$  en la ZMVM se debieron a las emisiones originadas en el complejo de Tula y menos del 10% proveniente del volcán, con el balance remanente debido a las fuentes locales.
- Los resultados de modelación de los datos de superficie sugieren que Tula fue una fuente más significativa de impactos de  $\text{SO}_2$  en la ZMVM que el volcán Popocatepetl durante los periodos de simulación seleccionados. Los modelos muestran que en algunos casos donde la pluma del volcán se transportó encima de la cuenca en el modelo, la estratificación vertical previno impactos en la superficie.
- Los resultados indican que el número de eventos con concentraciones extremas de  $\text{SO}_2$  es de alrededor del 18%, mientras que su contribución a la concentración total de  $\text{SO}_2$  observada se incrementa en alrededor del 60%. El porcentaje más alto es debido a la magnitud de las concentraciones de  $\text{SO}_2$  registradas durante los eventos.
- Tanto las simulaciones numéricas como los análisis estadísticos aplicados a las bases de datos de emisión del volcán Popocatepetl sugieren que la contribución de largo plazo de las emisiones volcánicas de  $\text{SO}_2$  a los impactos en la ZMVM es pequeña, aunque tal vez sean un poco más significativos en el sureste de la zona. Este resultado no excluye que dada las condiciones apropiadas de transporte sea posible una influencia muy grande sobre la ZMVM en el corto plazo para un evento de emisión volcánico determinado. También,

esto sugiere fuertemente que los impactos a largo plazo del volcán tienen un alcance espacial mucho mayor que a una escala local (~60 a 100 km), subrayando la importancia del impacto de las emisiones volcánicas del estudio del Popocatepetl a escala regional y global.

*j) Estudios de modelación de los impactos potenciales del cambio climático en la ZMVM*

El fenómeno del cambio climático y la calidad del aire han emergido como dos de los aspectos ambientales más importantes a escala regional y global. El cambio climático es inequívoco y en el futuro puede causar una degradación significativa de la calidad del aire regional y ésta a su vez contribuir también al cambio climático.

Estos dos aspectos están intrínsecamente acoplados a través de procesos de química atmosférica, radiativos y dinámicos. Es decir, los cambios en el clima pueden alterar parámetros meteorológicos, tales como temperatura, campos de viento, cobertura de nubes, humedad, el mezclado vertical, precipitación y patrones de viento sinópticos, y modificar por tanto las emisiones biogénicas que dependen en parte de estos parámetros. Dichas alteraciones pueden afectar en forma integral la calidad del aire en los procesos de formación de ozono superficial y la formación de material particulado. Además, la contaminación del aire puede afectar el clima a través de la modificación de las propiedades físicas y químicas de los aerosoles y de las nubes, así como de la capacidad oxidativa de la atmósfera y, por tanto, modificar el tiempo de vida de los gases de efecto invernadero.

Las observaciones recientes, las simulaciones con técnicas de modelación y la química atmosférica básica, sugieren la posibilidad de que dichos impactos sean significativos. Por ejemplo, existen análisis que muestran que los cambios en los patrones climatológicos juegan un rol mayor en establecer las condiciones que conducen a la formación y la acumulación de ozono troposférico.

En la ZMVM la temperatura del aire a nivel de superficie se ha incrementado unos pocos grados Celsius y la mayoría del incremento en la región urbana ha ocurrido en el último siglo debido en parte al efecto de la isla de calor urbana. Este fenómeno se ha manifestado en la ZMVM en un aumento de la temperatura de 6 a 8 °C como consecuencia del crecimiento de la urbanización y los cambios consecuentes del uso de suelo.

El impacto del aumento de temperatura en las concentraciones de ozono en la ZMVM fue investigado utilizando el modelo de calidad del aire CAMx, mediante un aumento sistemático y homogéneo de la temperatura. Los escenarios utilizados incluyeron casos bien validados de la calidad del aire para la ZMVM. Los resultados muestran que el máximo de ozono aumenta linealmente con la temperatura. El efecto de la temperatura varía espacialmente, con mayor sensibilidad en regiones donde ocurren concentraciones elevadas de ozono y con una menor sensibilidad en regiones con bajas concentraciones de ozono.

La sensibilidad estimada para la concentración horaria de O<sub>3</sub> con respecto a la temperatura es menor que las obtenidas en otros estudios en Europa y los Estados Unidos, particularmente en áreas urbanas, mientras que la sensibilidad a los promedios de 8 horas de las concentraciones de O<sub>3</sub> es mayor que la estimada en otras áreas urbanas.

Adicionalmente, el efecto de incrementos de emisiones biogénicas debido a incrementos de temperatura (representando un 30%), muestra aumentos adicionales a

la formación de ozono. Sin embargo, este efecto por sí solo es menor que el efecto de la temperatura solamente.

El modelo MCCM de calidad del aire puede describir la meteorología y la calidad del aire en la región y con ello se pueden evaluar escenarios de cambio climático; asimismo, un modelo acoplado puede describir mejor los procesos físicos y químicos en la zona de estudio. De los resultados de los escenarios futuros se observa que existe un incremento en la temperatura en la ZMVM de 4 °C y en las ciudades aledañas de 2 °C, para el caso de la capa de mezclado, ésta se incrementa entre 70 a 450 m en la ZMVM con respecto al caso base utilizado en 1980.

La concentración de ozono es menor en el escenario de 2070 en comparación con el caso de 1980 y puede deberse al incremento en la altura de la capa de mezcla. Con lo anterior se pudo obtener el efecto del cambio climático en las concentraciones de contaminantes ambientales, observándose que pueden existir variaciones desde -20 a 20 ppb teniéndose reducciones en la concentración de ozono en la ZMVM de cerca de un 10%.

*k) Implicaciones de política pública para el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMVM utilizando los resultados clave de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO 2006*

Los avances científicos en temas como la meteorología, la caracterización de fuentes de emisión, y los mecanismos de formación del ozono y de las partículas finas secundarias, obtenidas de las Campañas MCMA 2003 y MILAGRO 2006, tienen implicaciones importantes para el diseño de las nuevas políticas de mejoramiento de la calidad del aire y de mitigación del cambio climático en la ZMVM.

Muchos de los resultados de las Campañas MCMA 2003 y MILAGRO 2006 tienen implicaciones en las estrategias relacionadas con el abatimiento de la congestión del tráfico, el control del crecimiento de la flota vehicular, la eficiencia energética en los sectores de transporte privado y público, industrial, comercial y residencial.

Finalmente, dada la importancia de los inventarios de emisiones como herramientas claves para la evaluación y el diseño de los programas de manejo de la calidad del aire, los resultados de estas campañas subrayan la importancia de continuar los esfuerzos para mejorar la precisión y confiabilidad de los inventarios de emisiones de gases y partículas (particularmente del hollín).

En la Tabla 3.7.1 se presentan las recomendaciones emitidas por el conjunto de investigadores y científicos participantes en los estudios MCMA 2003 y MILAGRO 2006, las cuales han sido consideradas y analizadas con el fin de enriquecer el presente PROAIRE.

**Tabla 3.7.1. Implicaciones para la elaboración de políticas públicas en el mejoramiento de la calidad del aire en la ZMVM utilizando resultados clave de las campañas MCMA-2003 y MILAGRO 2006**

Política recomendada	Justificación
<b>A. Políticas relacionadas con la meteorología y dinámica</b>	
1. En la planeación de políticas públicas considerar el perfil temporal en el que se emiten los contaminantes	Los picos altos de contaminación por la mañana son afectados fuertemente por los flujos de ventilación con muy poco mezclado vertical antes de la salida del sol. La reducción de emisiones nocturnas y durante las primeras horas en la mañana tendría un gran impacto en los altos niveles de contaminantes en esas horas.
2. Incluir los flujos de ventilación nocturnos en las evaluaciones de impacto ambiental para el corredor industrial de Tula y el volcán Popocatepetl	Existen vientos estables y ligeros de la región de Tula hacia la ZMVM antes del amanecer y en algunas ocasiones después de la puesta del sol. Estos flujos pueden transportar y elevar las concentraciones de contaminantes en el aire de la ZMVM. Estos eventos de transporte deberían ser considerados tanto desde la perspectiva de calidad del aire como del análisis de riesgos. En contraste, se encontró que el volcán Popocatepetl tiene en general poca influencia en los niveles de la calidad del aire en la ZMVM en superficie. Sin embargo, los eventos en donde la influencia es significativa ocurren durante periodos de altos mezclados verticales de la pluma debido a la altura de la capa de mezclado y la fuerte dilución. Sin embargo, a escala regional, los resultados indican que las emisiones volcánicas sí pueden llegar a tener una influencia importante en la calidad del aire.
3. Desarrollar planes de contingencia con base en los procesos de ventilación de la cuenca	Se ha encontrado que los días con mala calidad del aire en la ZMVM pueden ser el resultado de contaminantes emitidos en un día previo con poca ventilación. Por lo tanto, las acciones de respuesta rápida deberían ser enfocadas a las emisiones nocturnas y de la mañana.
<b>B. Políticas relativas a mejorar el inventario de emisiones</b>	
4. Mejorar la cuantificación de las emisiones de vehículos a diesel	En comparación con los vehículos a gasolina, los vehículos a diesel contribuyen desproporcionadamente a las emisiones de NO <sub>x</sub> y especialmente en PM <sub>2.5</sub> . Estudios recientes de las emisiones de las fuentes móviles subrayan la importancia de tener una mejor cuantificación de las emisiones gaseosas y de partículas de vehículos a diesel en la ZMVM. Se sugiere: (a) Llevar a cabo una campaña de mediciones específicamente diseñada para caracterizar las emisiones de vehículos a diesel en circulación en la ZMVM; (b) Mejorar las bases de datos de los inventarios en cuanto a la clasificación y el número de vehículos a diesel locales y no-locales que circulan en la ZMVM; (c) Desarrollar factores de emisión locales de vehículos a diesel; y, (d) como parte del desarrollo del inventario de emisiones, llevar a cabo cálculos de

Política recomendada	Justificación
	balance de masa del combustible consumido por los vehículos a diesel en la ZMVM.
5. Investigar las fuentes generadoras de los altos niveles de metanol en la ZMVM	Las concentraciones de metanol son particularmente altas en la ZMVM. Aunque el metanol puede tener un origen industrial, la quema de biomasa puede también contribuir a los altos niveles de concentración de este compuesto y esto debería ser investigado.
6. Investigar a fondo las fuentes de partículas primarias en la ZMVM	Las mediciones recientes y los estudios de modelación sugieren que las emisiones de partículas pueden estar subestimadas en las estimaciones actuales del inventario de emisiones. Esto puede deberse a las incertidumbres en las bases de datos durante el desarrollo de los inventarios de emisiones para varias fuentes de emisión claves. Estas incluyen las emisiones de vehículos a diesel, la resuspensión de partículas en carreteras, las emisiones industriales, y otras. Las incertidumbres en las estimaciones de emisiones de otras categorías de fuentes pueden impactar adicionalmente en las discrepancias actuales identificadas para varios compuestos de COV, incluyendo el benceno y el tolueno. En general, estos resultados tienen implicaciones importantes en el desarrollo de inventarios de emisiones.
7. Análisis de incertidumbres en el inventario de emisiones	Las técnicas denominadas "de abajo-hacia-arriba" introducen varios grados de incertidumbre para las diferentes categorías de fuentes de emisión consideradas durante el desarrollo de un inventario de emisiones. Sin embargo, el desarrollo del inventario de emisiones se puede beneficiar considerablemente con la aplicación consistente de métodos estándar de estimación de incertidumbres durante los procedimientos de estimación de emisiones. La aplicación formal de técnicas de estimación de incertidumbres puede tener grandes beneficios porque puede ayudar a identificar problemas y prioridades para mejorar el inventario.

<b>Política recomendada</b>	<b>Justificación</b>
8. Cuantificación de la distribución de la volatilidad de las emisiones de los aerosoles orgánicos	Los avances recientes en las investigaciones de emisiones de las partículas, han mostrado que en los procesos físicos que ocurren justo después de que las emisiones se mezclan con el aire ambiente, se produce una transferencia de masa entre las fases de gas y de partículas en una forma mucho más dinámica que lo que anteriormente se creía. Los resultados de las campañas en la ZMVM han provisto información importante sobre la composición de las partículas y el grado de oxidación en varias edades. Esta información puede ser utilizada para ayudar a desarrollar un inventario local de las partículas con una distribución de sus constituyentes basada en mediciones. La reducción de las incertidumbres en la distribución de los constituyentes de las partículas es un paso importante en la utilización de modelos de calidad del aire para la evaluación de las estrategias para controlar la formación secundaria de aerosoles.
9. Actualizar los perfiles y factores de emisión locales de COV para la ZMVM	Estos dos tipos de información son críticos para el desarrollo de un inventario de emisiones. Sin embargo, debido a que dependen fuertemente de la tecnología y condiciones locales, cambian continuamente con el tiempo. La estimación de las emisiones en el inventario de emisiones se beneficiaría mucho, actualizando las bases de datos de factores de emisiones y los perfiles de COV. Los esfuerzos en este sentido se han dirigido históricamente hacia las fuentes móviles; sin embargo, las bases de datos para fuentes biogénicas, industriales y otras basadas en datos de población, pueden también beneficiarse.
<b>C. Políticas de control de emisiones</b>	
10. Incentivar o hacer obligatorio el uso de pinturas de bajos COV	La aplicación de pinturas es responsable del 20% de las emisiones de tolueno, y emite además xilenos. El tolueno y los xilenos contribuyen significativamente a la reactividad de los COV y por tanto, a la formación de ozono además de ser los contribuyentes aromáticos más relevantes para la formación de aerosoles orgánicos secundarios. Las nuevas regulaciones ambientales y la demanda del consumo han llevado al desarrollo de pinturas y acabados de bajo y nulo contenido de COV. La mayoría de los fabricantes producen ahora una o más variedades de pinturas sin COV. Estas nuevas pinturas son además durables, costo-efectivas y menos dañinas al ambiente y a la salud humana.

Política recomendada	Justificación
11. Programa para la verificación/prueba de mantenimiento en carretera para taxis y otros vehículos altamente contaminantes	Tales programas han sido considerados en el pasado como muy costosos o difíciles en su ejecución. Sin embargo, si es dirigido a taxis y vehículos altamente contaminantes solamente, y utilizado en combinación con un programa de microfinanciamiento, este tipo de programas crearían incentivos eficientes para algunos de los vehículos más contaminantes (en comparación con otros vehículos en la ZMVM, los taxis tienen mucho más kilómetros recorridos por día) para cambiar a una tecnología menos contaminante.
12. Reducir la emisión de aldehídos de fuentes móviles	Las concentraciones ambiente de aldehídos y otros oxigenados medidos en la ZMVM sugieren que estos compuestos contribuyen significativamente a la reactividad de COV. Las fuentes móviles (tanto de vehículos a diesel como a gasolina) contribuyen significativamente a estos compuestos en la ZMVM. Las reducciones de las emisiones de fuentes móviles pueden ayudar a reducir la contribución de la reactividad de COV por los compuestos oxigenados. El uso de mezclas de etanol en las gasolinas, puede incrementar las emisiones de carbonilos. A la fecha no se conoce el incremento en las emisiones de carbonilos por uso de estas mezclas bajo condiciones de operación características de las ZMVM, ni su efecto en la reactividad del smog fotoquímico en la región. Se recomienda realizar estudios en estos temas antes de implementar el uso de estas mezclas.
13. Incentivar la renovación de la flota vehicular y la remoción de vehículos altamente contaminantes	Los análisis de correlación entre los cambios en la flota vehicular y las tendencias en las emisiones han mostrado que a pesar de los grandes incrementos en el tamaño de la flota vehicular, las emisiones asociadas no se han incrementado en la misma proporción. Esto es el resultado del efecto combinado de la remoción de los vehículos con mayor edad de la flota y de las tecnologías mucho más limpias incorporadas en los vehículos nuevos. Esto también sugiere fuertemente que incrementando la tasa de renovación de la flota vehicular de la ZMVM, puede tener grandes beneficios en términos de masa de COV y reducción de emisiones de NO <sub>x</sub> .
14. Incentivar el uso del transporte público sobre el vehículo privado en la planeación urbana	Las preferencias de modos de transportación de baja capacidad deberían ser cambiadas hacia modos de alta capacidad con un diseño integral y organizado del desarrollo de la ZMVM y la planeación urbana. Lo más importante es que los modos de transporte público deberían ser favorecidos sin comprometer la comodidad, la eficiencia y la seguridad durante el transporte.

Política recomendada	Justificación
15. Programa de apoyo para la implementación de controles de emisiones en la flota vehicular a diesel	La flota vehicular a diesel en la ZMVM tiende a ser antigua, tener tasas de renovación lentas y no contar con sistemas de control de emisiones. Esto sugiere que un programa de apoyo para la implementación de controles de emisiones en la flota vehicular a diesel puede tener beneficios significativos para reducir los impactos de sus emisiones.
16. Control de fugas en la distribución y en el uso del gas licuado de petróleo	La concentración de COV totales en la ZMVM continúa dominada por alcanos de bajo peso molecular, particularmente propano. Esta situación no ha cambiado desde hace por lo menos 15 años, cuando Blake y Rowland (1995) reportaron altos niveles de estos compuestos en la ZMVM debido al uso extensivo del gas licuado de petróleo (GLP) como el combustible más utilizado en la cocción de alimentos y en calentadores de agua. Por lo tanto, es necesario un programa para el control de fugas durante la distribución y uso de GLP.
17. Reducir las emisiones de SO <sub>2</sub> y NH <sub>3</sub>	Los niveles de SO <sub>2</sub> se han reducido continuamente en la ZMVM como resultado de varias políticas de control de emisiones. Entre ellas, la introducción de gasolinas y diesel con bajo contenido de azufre ha jugado un papel importante en la reducción de los niveles de SO <sub>2</sub> . No hay mediciones continuas de sulfatos en la ZMVM, pero debido a que los niveles de amoníaco son relativamente altos, es posible que la formación de sulfatos ha sido disminuida en comparación con hace una década o más. Sin embargo, debido a que las tasas de formación de estos compuestos inorgánicos son relativamente lentas, la reducción de las emisiones de ambos SO <sub>2</sub> y NH <sub>3</sub> puede tener beneficios al reducir los niveles de PM inorgánicos viento abajo en escalas regionales.
18. Control y manejo de emisiones de quema abierta de biomasa	La contribución de los incendios forestales a los niveles ambientales de varios contaminantes (incluyendo las partículas) en la ZMVM puede ser significativa durante la temporada seca cálida. La contribución de la quema de biomasa en actividades de agricultura puede también ser muy importante, pero su cuantificación ha sido menos estudiada. Es claro, sin embargo, que políticas de control hacia la reducción y el control de las emisiones de la quema de biomasa tendrá beneficios substanciales en los impactos a escala regional.
19. Control de emisiones provenientes del uso de biocombustibles sólidos	El uso de combustibles sólidos puede ser una fuente de contaminación importante en la periferia de la ZMVM y las áreas rurales adyacentes. Las mejoras tecnológicas relativamente baratas pueden llevar a reducciones significativas en las emisiones de las partículas y otros contaminantes.

Política recomendada	Justificación
20. Control de emisiones provenientes de la quema de basura	La quema de basura ha sido poco caracterizada todavía, pero puede ser potencialmente una fuente importante de emisiones en la ZMVM. La prohibición de la quema de basura y otras políticas relacionadas tales como incentivos para el reciclamiento de desperdicios y basura pueden por tanto tener beneficios importantes en la reducción de emisiones.
21. Control de emisiones por buen manejo del uso de suelos	El manejo sustentable del uso de suelos agrícolas, forestales y del ex-lago de Texcoco, puede ayudar a reducir las emisiones por resuspensión de partículas que afectan la calidad del aire en la ZMVM.
22. Control regional de emisiones	Las diferentes fuentes de emisiones en la ZMVM pueden contribuir significativamente a los impactos en los niveles de contaminación a escala regional. De igual manera, las emisiones generadas en la región central del país, pero fuera de la ZMVM, pueden también contribuir a altos niveles de contaminación. En particular, beneficiaría la homologación del control de emisiones vehiculares en los estados de la región central del país, al igual que el contar con una red regional de monitoreo de la calidad del aire.
23. Implementar políticas que estimulen la evaluación del impacto de la contaminación atmosférica en la salud humana	Estos estudios apoyan el hecho de que las fuentes locales de contaminación atmosférica juegan un papel predominante en los efectos agudos observados en las poblaciones estudiadas y en los efectos tóxicos evaluados in vitro. Sin embargo, todavía existen huecos para entender la participación relativa que tienen las interacciones entre los contaminantes localmente emitidos y aquellos que son transportados de fuentes más lejanas, en los efectos crónicos sobre la salud de las poblaciones expuestas.

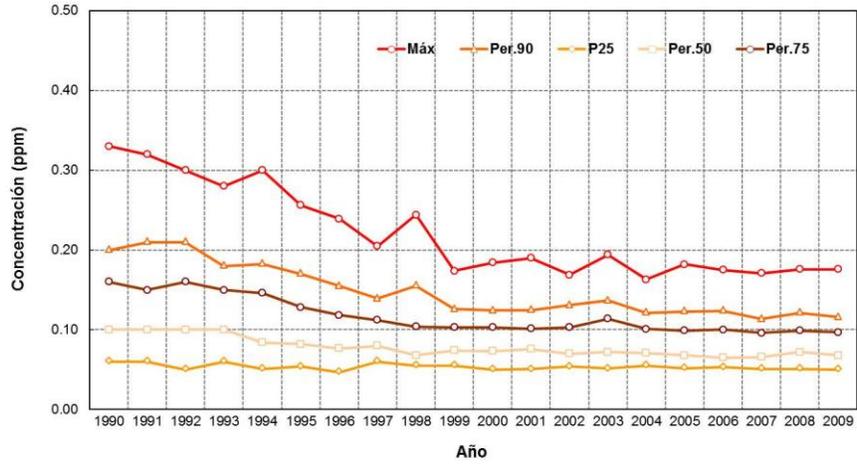
### **Análisis comparativo de la ZMVM y Los Ángeles, EUA**

En el año 2010 se realizó un análisis comparativo de las concentraciones máximas diarias de ozono en la ZMVM y la ciudad de Los Ángeles, California, para el período 1990 – 2009 (SMA-DF, 2010). La delimitación del área considerada para el caso de la ciudad norteamericana es la correspondiente a la Cuenca Aérea de la Costa Sur (SoCAB por sus siglas en inglés).

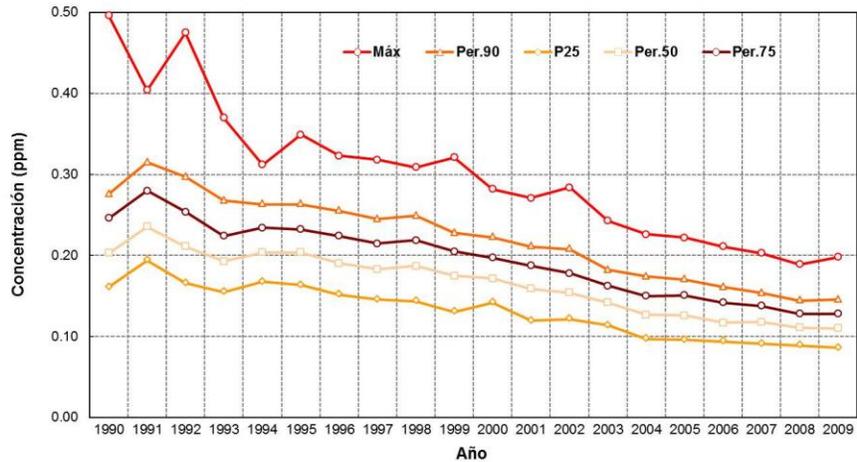
Como se puede observar en las Gráficas 3.7.1.a-b, 3.7.2 y 3.7.3, tanto las concentraciones máximas del ozono como las tasas de cambio correspondientes, han ido a la baja en ambas zonas metropolitanas. Sin embargo, las tasas de cambio de la ZMVM han sido ligeramente mayores a lo largo del período considerado.

**Gráficas 3.7.1.a-b. Comportamiento del ozono en el período 1990-2009 (Concentración máxima diaria)**

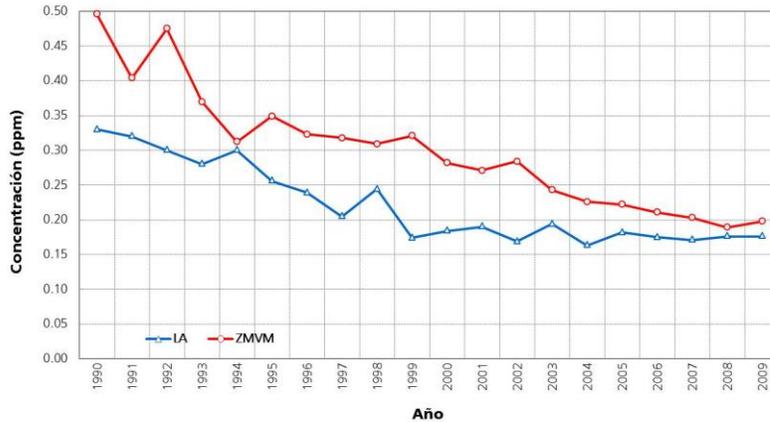
**a. Cuenca Aérea de la Costa Sur – SoCAB**



**b. Zona Metropolitana del Valle de México – ZMVM**

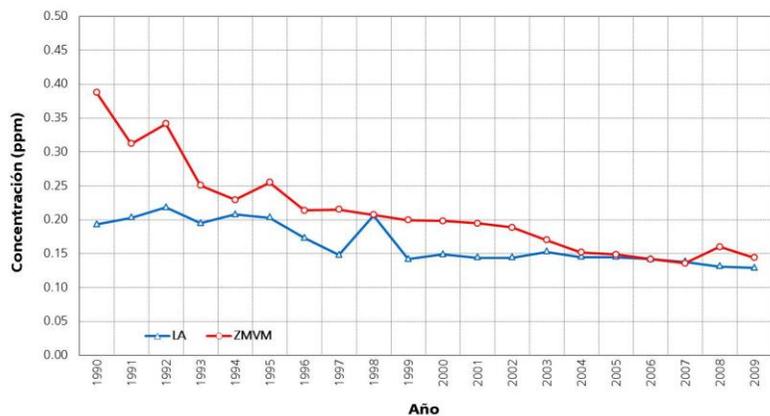


**Gráfica 3.7.2. Tendencia de la concentración máxima anual de ozono en la SoCAB y ZMVM, 1990-2009**



Región	Tasa de cambio (ppm/año)
SoCAB	0.0086
ZMVM	0.0139

**Gráfica 3.7.3. Tendencia de la concentración máxima anual del promedio de 8 horas de ozono en la SoCAB y ZMVM, 1990-2009**



Región	Tasa de cambio (ppm/año)
SoCAB	0.0044
ZMVM	0.0105

### **Relación entre las concentraciones de PM<sub>10</sub> y áreas verdes**

Con el propósito de explorar una posible relación entre las concentraciones medidas de PM<sub>10</sub> y la masa vegetal del entorno, se hizo un ejercicio en el que se evalúa la relación entre la magnitud de las concentraciones registradas en las estaciones con equipos automáticos del Sistema de Monitoreo Atmosférico (SIMAT) y las áreas verdes de sus áreas de influencia (Muñoz, PAOT, 2010).

Las concentraciones analizadas correspondieron al año 2009 y provienen de los equipos automáticos y equipos de alto volumen (Tabla 3.7.2); se procesaron como promedios diarios de 24 horas y posteriormente se obtuvieron indicadores al promedio y al percentil 90 (P90)<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Para el cálculo de las áreas verdes se empleó la información del inventario de las áreas verdes del Distrito Federal elaborado por la PAOT en 2009 y que tiene como líneas base de información los inventarios realizados por la PAOT y por la Secretaría de Medio Ambiente (SMA) en 2006.

**Tabla 3.7.2. Indicadores de PM<sub>10</sub> obtenidos con información de equipos automáticos (µg/m<sup>3</sup>)**

Estación de monitoreo	Época seca-fría		Época seca-caliente	
	media	P95	Media	P95
La Villa (LVI)	68	113	62	89
Tlalnepantla (TLA)	67	115	63	87
Xalostoc (XAL)	108	164	82	118
Merced (MER)	58	102	61	89
Pedregal (PED)	38	65	45	65
Cerro de la Estrella (CES)	54	85	56	77
Tultitlán (TLI)	67	99	Sin datos	
Villa de las Flores (VIF)	85	142	76	109
Tláhuac (TAH)	55	97	62	90
Santa Úrsula (SUR)	47	78	51	75
ENEP Acatlán (EAC)	49	83	55	78
Plateros (PLA)	46	66	48	67
San Agustín (SAG)	66	116	65	96
Taxqueña (TAX)	56	85	56	79
Iztacalco (IZT)	56	89	56	78

Las áreas verdes del suelo urbano fueron identificadas con imágenes de satélite obtenidas por el sensor multiespectral denominado *QuickBird02*<sup>3</sup> con resolución espacial de 60 cm, lo que permite visualizar de forma detallada la cobertura arbórea, pastos, arbustos y áreas deportivas. Éstas últimas se incluyen por primera vez en este tipo de inventarios debido a que solían confundirse con áreas arboladas. En el inventario 2009 también se incluyó la información de una imagen de satélite multiespectral proveniente del sensor *Spot5*<sup>4</sup>, con una resolución espacial de 10 m. El resultado del proceso de estas imágenes fueron áreas mínimas cartografiables<sup>5</sup> de 50 m<sup>2</sup>, a través de las cuales se pudo identificar el arbolado susceptible de manejo y corredores de vegetación. En el caso del suelo de conservación, las áreas verdes se identificaron de forma general por medio de una clasificación espectral con una imagen *Spot* de diciembre de 2008, por lo que no se identificaron tipos de bosques o especies.

<sup>3</sup> Sistema de detección a distancia empleado desde un satélite, con el cual se obtiene información de la superficie de la Tierra. Pueden ser activos (que transmiten sus propias emanaciones electromagnéticas a un objeto y registra la energía reflejada o refractada de regreso al sensor), o pasivos (usan la porción visible del espectro electromagnético).

<sup>4</sup> Imágenes proporcionadas por SPOT Image, S.A., a través del Convenio ERMEX-PAOT con la Secretaría de Marina.

<sup>5</sup> Es el tamaño de área mínima que debe aparecer en un mapa temático, cuando se aplica en percepción remota.

Los resultados obtenidos del proceso de imágenes se ajustaron por medio de fotointerpretación, usando como referencia las imágenes QuickBird y el Atlas de uso de suelo y vegetación del 2006 (SEDEREC, 2006). Con este método se discriminan las áreas sin cobertura vegetal y sólo se exponen las áreas con cualquier tipo de vegetación viva, incluidas las áreas agrícolas de temporal y de riego, mismas que posteriormente fueron re-clasificadas como áreas agrícolas, de tal manera que el producto final es un mapa complementario con el de la zona urbana con tres categorías para el suelo de conservación: árboles, pastos/arbustos y zona agrícola.

**Tabla 3.7.3. Extracción de cobertura vegetal para cada tipo de vegetación**

<b>Estación</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Estación</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>
<b>CES</b>	<b>10'201,352.71</b>	<b>PLA</b>	<b>18'986,740.88</b>
Áreas Deportivas	705,211.05	Áreas Deportivas	391,101.75
Arbolado	4'783,578.30	Arbolado	14'935,454.22
Pastos/Arbustos	6'508,222.78	Pastos/Arbustos	3'660,184.90
Vaso regulador	60,459.98		
<b>EAC*</b>	<b>2'025,591.11</b>	<b>SUR</b>	<b>18'876,207.06</b>
Áreas Deportivas	141,247.13	Áreas Deportivas	836,509.83
Arbolado	1'536,662.54	Arbolado	14'168,989.59
Pastos/Arbustos	347,681.43	Pastos/Arbustos	3'870,707.64
<b>IZT</b>	<b>10'242,902.90</b>	<b>TAX</b>	<b>12'288,832.68</b>
Áreas Deportivas	772,854.65	Áreas Deportivas	686,349.10
Arbolado	7'536,267.72	Arbolado	8'946,344.75
Pastos/Arbustos	1'933,780.53	Pastos/Arbustos	4'107,513.77
<b>LVI</b>	<b>9'295,193.67</b>	<b>TLA*</b>	<b>2'301,624.96</b>
Áreas Deportivas	909,690.26	Áreas Deportivas	243,560.26
Arbolado	6'320,213.45	Arbolado	1'693,088.77
Pastos/Arbustos	2'065,289.96	Pastos/Arbustos	364,975.93
<b>MER</b>	<b>9'611,668.78</b>	<b>XAL*</b>	<b>465,833.89</b>
Áreas Deportivas	688,224.93	Áreas Deportivas	23,499.45
Arbolado	6'695,957.38	Arbolado	249,137.21
Pastos/Arbustos	2'227,486.47	Pastos/Arbustos	193,197.22
<b>PED</b>	<b>24'666,337.39</b>	<b>TAH</b>	<b>1'559,896.65</b>
Áreas Deportivas	374,558.49	Áreas Deportivas	115,100.73
Arbolado	20'013,348.35	Agrícola	38'264,852.41
Pastos/Arbustos	4'278,430.55	Arbolado	653,994.69
		Pastos/Arbustos	7'391,314.99

\*Estimación correspondiente al área del Distrito Federal

Las estaciones de monitoreo del SIMAT tienen una altura que oscila entre 3 y 12 metros y sus alrededores están libres de obstáculos, características físicas que las definen como estaciones de tipo urbano y se asume que la medición que hacen de las PM<sub>10</sub> son representativas espacialmente; técnicamente se reconoce que la representatividad alcanza un radio de 5 kilómetros. El resultado de la extracción de la cobertura vegetal total y para cada tipo de vegetación se muestra en la Tabla 3.7.3.

Los resultados indican que en las dos etapas climáticas estudiadas se aprecia una relación identificable entre la cobertura vegetal y las concentraciones de PM<sub>10</sub>: a mayor cobertura vegetal menor es la concentración de PM<sub>10</sub>. El suroeste del Distrito Federal con una mayor cobertura se asocia con las menores concentraciones de estas partículas, ya sea como promedio o como eventos extraordinarios.

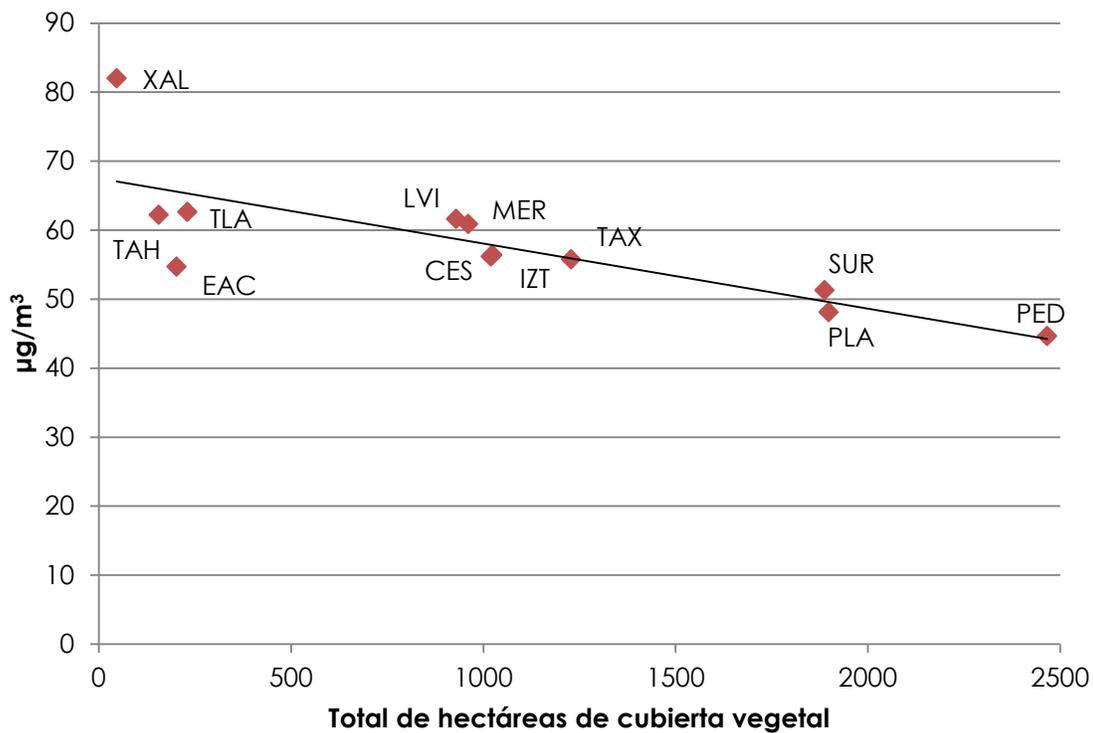
En la estación de monitoreo La Villa (LVI) ubicada al norte de la ZMVM, así como en estaciones del centro y el oriente, con áreas de cobertura vegetal que fluctúan entre 9.2 y 10.2 millones de m<sup>2</sup>, se presentan concentraciones de PM<sub>10</sub> intermedias con respecto de las concentraciones del suroeste y con estaciones del norte, como son Xalostoc (XAL), Tlalnepantla (TLA) y ENEP Acatlán (EAC).

El caso de Tláhuac (TAH) es notable por la magnitud que presentan las concentraciones de PM<sub>10</sub> en ambas épocas. Hay que señalar que la cobertura vegetal estimada de 1.5 millones de m<sup>2</sup> contempló 35,397 m<sup>2</sup> de suelo agrícola y que no se incluyó la superficie del suelo de conservación. Es posible que las concentraciones altas de este tipo de partículas se deban a la erosión del suelo de los campos de cultivo o de otro tipo dentro del área de suelo de conservación.

Como consecuencia de la similitud del comportamiento entre los registros de PM<sub>10</sub> obtenidos con equipos automáticos y con equipos manuales, es plausible suponer que las partículas provienen de fuentes naturales.

A continuación se muestran las Gráficas 3.7.4 y 3.7.5:

**Gráfica 3.7.4. Época seca – caliente: PM<sub>10</sub> promedio vs cobertura vegetal total**



**Gráfica 3.7.5. Época seca – fría: PM<sub>10</sub> promedio vs cobertura vegetal total**

